

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA



PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIO DE CURVATURA DA RAMPA
E STINGER NAS TENSÕES EM DUTOS EM PLATAFORMA DE
LANÇAMENTO

Prof. Orientadores: Carl Horst Albrecht

Fabício Nogueira Corrêa

Caio Marchetti Tavares

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIO DE CURVATURA DA RAMPA
E STINGER NAS TENSÕES EM DUTOS EM PLATAFORMA DE
LANÇAMENTO

Caio Marchetti Tavares

2013

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIO DE CURVATURA DA RAMPA E STINGER NAS TENSÕES EM DUTOS EM PLATAFORMA DE LANÇAMENTO

Caio Marchetti Tavares

Projeto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval e Oceânica.

Orientadores: Carl Horst Albrecht

Fabricio Nogueira Corrêa

RIO DE JANEIRO

2013

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIOS DE CURVATURA DA RAMPA E STINGER NAS TENSÕES EM DUTOS EM PLATAFORMA DE LANÇAMENTO

Caio Marchetti Tavares

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA.

Aprovado por:

Prof. Carl Horst Albrecht D. Sc

Prof. Fabrício N. Corrêa D.Sc

Prof. Luiz Antonio Vaz Pinto, D.Sc

Prof. Breno Pinheiro Jacob D. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2013

Tavares, Caio Marchetti

Análise da influência do raio de curvatura da rampa e stinger nas tensões em dutos em plataforma de lançamento/ Caio Marchetti Tavares. – Rio de Janeiro: Escola Politécnica/UFRJ, 2013.

IX, 85.: il, 29,7cm

Orientador: Carl Horst Albrecht

Projeto Final (graduação) – UFRJ/ Poli/ Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 94.

1. Lançamento de duto. 2. Análises numéricas. 3. Stinger e rampa. I. Albrecht, Carl Horst; Correa, Fabricio Nogueira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Rogerio e Eliana por ter sempre incentivado meu crescimento pessoal, e aos meus irmãos Yuri e Lucas.

Ao meu orientador, o professor Fabrício Nogueira Corrêa pela excelente orientação para a realização desse trabalho.

A Carl Horst Albrecht e Mauro Henrique Alves de Lima Junior pela orientação contribuindo grandemente à realização desse trabalho.

Aos amigos do LAMCSO.

Resumo do Projeto apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção da graduação em Engenharia Naval e Oceânica.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIOS DE CURVATURA DA RAMPA E STINGER NAS TENSÕES EM DUTOS EM PLATAFORMA DE LANÇAMENTO

Caio Marchetti Tavares

2013

Orientadores: Carl Horst Albrecht

Fabricio Nogueira Correa

Departamento: Engenharia Naval e Oceânica

Este trabalho faz uma breve descrição dos métodos de lançamento de dutos submarinos atualmente existentes e cita os métodos numéricos para análise deste tipo de sistema. Também estuda as regras aplicáveis ao projeto de dutos e usa as mesmas para a busca do ângulo ideal de lançamento da rampa e “stinger” em diferentes profundidades. Finalmente, conclusões são apresentadas em relação aos resultados e propostas são sugeridas para novos trabalhos nessa área.

Abstract of Dissertation presented to Escola Politécnica/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Naval Engineering.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE RADIUS OF CURVATURE OF RAMP
AND STINGER IN TENSIONS IN PIPELINES IN LAUNCH PAD

Caio Marchetti Tavares

2013

Advisors: Carl Horst Albrecht

Fabricio Nogueira Correa

Department: Naval and Ocean Engineering

This paper gives a brief description of launching submarine pipelines methods currently in use, and shows numerical methods commonly used to simulate this type of system. It also studies the applicable rules of the design of pipelines and uses it to find the ideal angle of launch ramp and "stinger" at different depths. Finally, conclusions are presented related to the results and proposals are suggested for new papers in this area.

Conteúdo

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	HISTÓRICO E MOTIVAÇÃO.....	10
1.2.	OBJETIVO DO TRABALHO.....	10
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2	DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE LANÇAMENTO	12
3	CRITÉRIOS NORMATIVOS DE PROJETO	15
3.1	PRESSÃO INTERNA (BURSTING)	16
3.2	FLAMBAGEM LOCAL (LOCAL BUCKLING)	16
3.2.1	<i>Colapso do sistema.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Propagação do colapso.....</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Flambagem Local – Critério de carregamento combinado.....</i>	<i>18</i>
3.3	CRITÉRIO SIMPLIFICADO DE LANÇAMENTO	22
4	CARREGAMENTOS AMBIENTAIS	23
4.1	ONDAS	24
4.2	CORRENTEZA	25
4.3	VENTO	25
5	METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE SISTEMAS OFFSHORE	27
5.1	METODOLOGIA DESACOPLADA.....	27
5.2	METODOLOGIA ACOPLADA.....	28
5.3	METODOLOGIA HÍBRIDA.....	28
6	DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO.....	28
7	CÁLCULO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO DUTO UTILIZADO	33
8	ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES.....	37
8.1	INTRODUÇÃO	37
8.2	ANÁLISES ESTÁTICAS	37
8.2.1	<i>Profundidade 25m</i>	<i>38</i>
8.2.2	<i>Conclusões para análise de profundidade de 25m</i>	<i>49</i>
8.2.3	<i>Análise de Tensões para profundidade de 35m</i>	<i>50</i>
8.2.4	<i>Conclusões para análise de profundidade de 35m</i>	<i>64</i>
8.2.5	<i>Análise de Tensões para profundidade de 45m</i>	<i>65</i>
8.2.6	<i>Conclusões para análise de profundidade de 45m</i>	<i>77</i>
8.3	CONCLUSÃO PARA ANÁLISES ESTÁTICAS	77
8.4	ANÁLISES DINÂMICAS	78
8.4.1	<i>Profundidade de 25m e período 5s.....</i>	<i>79</i>
8.4.2	<i>Profundidade de 35m e período 5s.....</i>	<i>80</i>
8.4.3	<i>Profundidade de 45m e período 5s.....</i>	<i>81</i>
8.4.4	<i>Profundidade de 25m e período 6.5s.....</i>	<i>82</i>
8.4.5	<i>Profundidade de 35m e período 6.5s.....</i>	<i>83</i>
8.4.6	<i>Profundidade de 45m e período 6.5s.....</i>	<i>84</i>
8.4.7	<i>Profundidade de 25m e período 8s.....</i>	<i>85</i>
8.4.8	<i>Profundidade de 35m e período 8s.....</i>	<i>86</i>
8.4.9	<i>Profundidade de 45m e período 8s.....</i>	<i>88</i>
8.5	CONCLUSÃO PARA ANÁLISES DINÂMICAS	90
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	91
9.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	91
9.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
10	REFERÊNCIAS.....	94

1.Introdução

1.1. *Histórico e Motivação*

A exportação de gás do mar para a terra através de gasodutos tem crescido atualmente devido ao aumento da atividade de exploração de poços de petróleo em distancias consideráveis em relação a terra.

Muitas vezes por não possuírem sistemas de exportação de gás associados, os campos de petróleo vêm sendo desenvolvidos utilizando a reinjeção deste gás em reservatórios para posterior recuperação. Hoje, tais campos petrolíferos são cada vez mais comuns e juntamente com a valorização do gás, políticas restritivas a sua queima, devidamente alinhadas com os processos de otimização dos recursos energéticos, assim como com a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera, o transporte do gás oriundo do desenvolvimento destes campos para os terminais e refinarias em terra apresenta-se como um desafio, por isso o surgimento de plataformas que fazem a instalação de dutos para a exploração de gás do mar para a terra como é o caso da plataforma a ser analisada nesse trabalho.

1.2. *Objetivo do trabalho*

Este trabalho tem como objetivo avaliar as tensões e deformações num duto de 14 polegadas usando critérios simplificados de lançamento da DNV-OS-F101. Inicialmente será estudada, para uma profundidade, a influência do raio da curvatura do stinger juntamente com a rampa nas tensões ao longo do duto, Numa primeira etapa, serão realizadas apenas simulações estáticas a fim de selecionar o duto que apresenta as menores tensões. Em seguida, serão realizadas simulações dinâmicas para o duto selecionado para avaliar sua resposta considerando o efeito do movimento dinâmico da embarcação de lançamento. Este mesmo procedimento será repetido para diferentes profundidades. O software usado para esse fim será o Situa-Prosím.

1.3. Organização do trabalho

Inicialmente no Capítulo 2 são descritos os métodos de lançamentos de dutos rígidos atualmente existentes, depois é apontado o método utilizado no trabalho.

No Capítulo 3 os critérios normativos baseados na DNV-OS-F101 são apresentados para o projeto de dutos submarinos e também para o seu lançamento.

Em seguida no capítulo 4 são estudados os carregamentos ambientais tanto no seu entendimento físico quanto na forma de se aplicar as teorias existentes em um modelo de elementos finitos.

No capítulo 5 é descrito as metodologias de análise de modelos de sistemas off-shore: a metodologia híbrida, desacoplada e acoplada.

No capítulo 6 é descrito o modelo de plataforma utilizado nesse projeto, apresentando suas características como dimensões principais, calado, comprimento da rampa e comprimento do stinger.

No capítulo 7 são calculadas propriedades físicas do duto de estudo, estes dados são essências como dados de entrada do programa de elementos finitos Situa-Prossim.

No capítulo 8 são feitas todas as análises estáticas para diferentes curvaturas de rampa e stinger; essas análises são feitas na profundidade 25 , 35 e 45m. Depois de todas análises feitas é concluído qual é o raio de curvatura ideal para cada uma das profundidades. Em seguida são feitas análises dinâmicas no modelo e são comparadas com as normas de lançamento de dutos.

E por fim, o capítulo 9 conclui este trabalho relatando as conclusões mais importantes de cada caso estudado com sugestões para futuros.

2 Descrição dos métodos de lançamento

Neste item serão abordados os métodos usuais de dutos rígidos submarinos e suas principais características, como forma de apresentar as particularidades inerentes a cada método, e como eles podem ser aplicados nos cenários offshore.

O método S-Lay consiste no lançamento do duto, onde a fabricação do duto é realizada horizontalmente na embarcação, na seção denominada FiringLine, originando alta flexão na saída do barco, na rampa (stinger), na região conhecida por overbend, bem como em outra junto ao fundo (sagbend).

A Figura 1 abaixo apresenta a operação de lançamento na qual se vê a embarcação, onde os segmentos do duto são soldados sobre uma rampa de montagem, contendo estações de soldagem, um ou mais tensionadores, que controlam a tração na linha e, conseqüentemente, os momentos concomitantes, e uma treliça (stinger), usada para suavizar ou minimizar a forte variação angular que o duto sofre ao deixar a embarcação.

A mesma Figura 1 mostra, ainda, a trajetória típica em “S” do duto até chegar a apoiar-se sobre o leito marinho. O projeto em questão consiste, basicamente, em definir a curvatura estabelecida por roletes discretos, instalados ao longo da rampa (ainda na embarcação) e ao longo do stinger, bem como a força a ser aplicada no tensionador, de modo a garantir a integridade estrutural do duto durante sua instalação. Ressalta-se que há roletes ao longo de toda a rampa de montagem para a movimentação do duto, mas que estes só passam a formar uma curva no trecho após os tensionadores, ou seja, há alinhamento perfeito dos segmentos soldados.

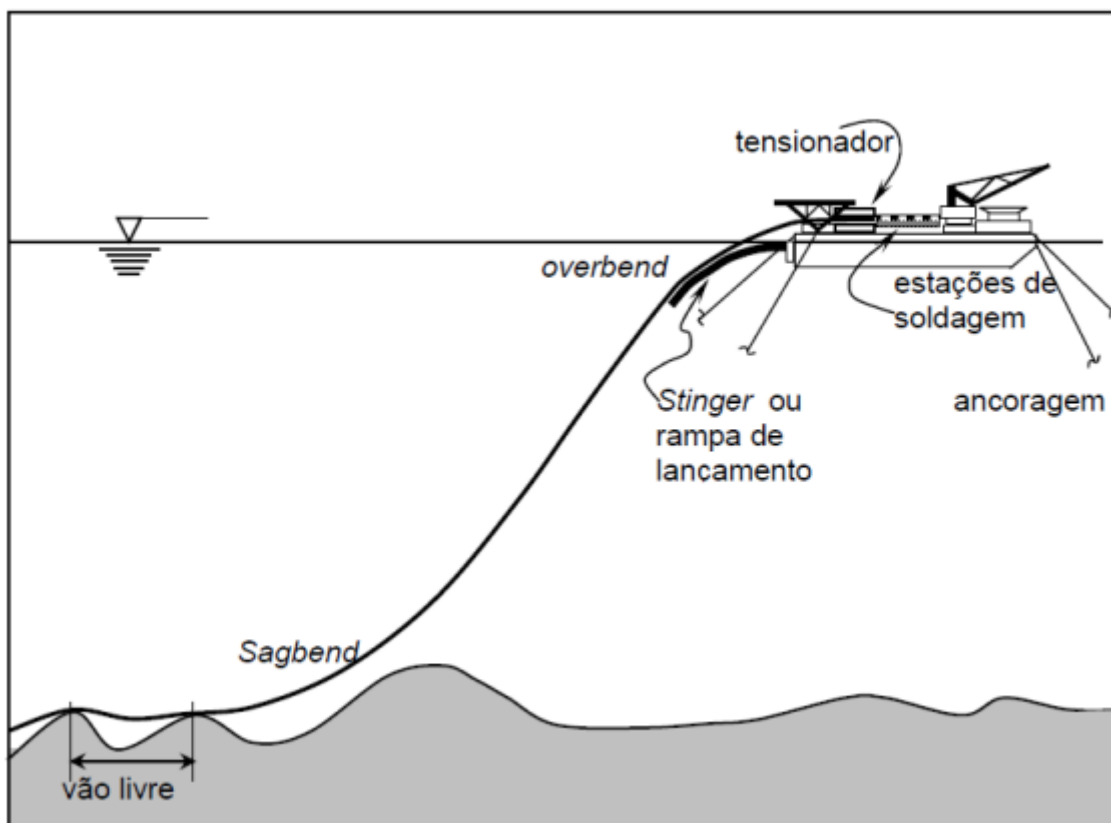


Figura 1 – Operação de Lançamento – Método S-Lay

O método J-Lay é similar ao método S-Lay, apenas a rampa de lançamento é construída em posição quase vertical, não havendo, nesta situação, a região de overbend. Por este motivo, este método foi desenvolvido primordialmente para águas profundas. Figura 2 - ilustra um lançamento utilizando o método J-Lay.

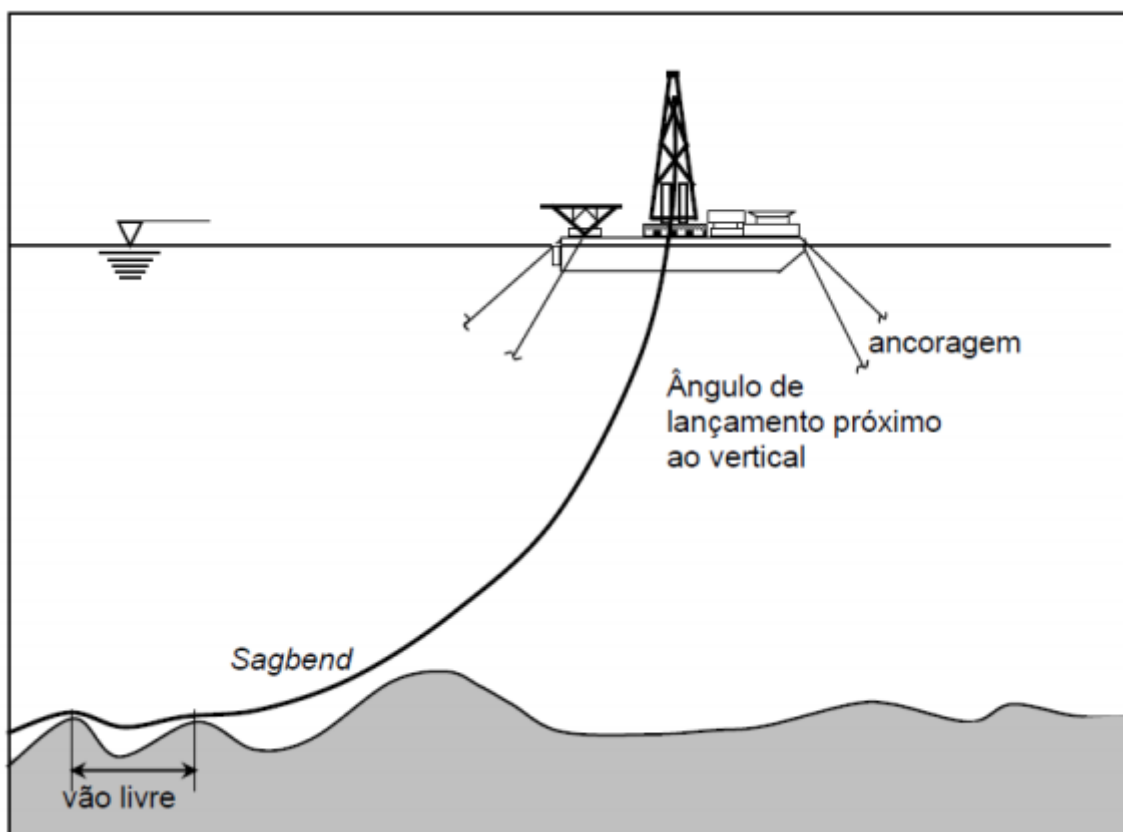


Figura 2 - Operação de lançamento - Método J-Lay.

No método Reel-Lay a linha é fabricada em terra e estocada em rolos de grande diâmetro no convés da embarcação para transporte e instalação. Neste caso, a grande limitação diz respeito ao diâmetro máximo do duto, que pode ser estocado desta forma. Este método tem sido utilizado para diâmetros de até 16 polegadas. Além disso, há que se considerar a impossibilidade da adoção de revestimento de concreto nestes dutos.

Uma vez que o concreto não resistiria à curvatura imposta pela estocagem. A única vantagem deste método, em relação aos outros, é a grande velocidade de instalação.

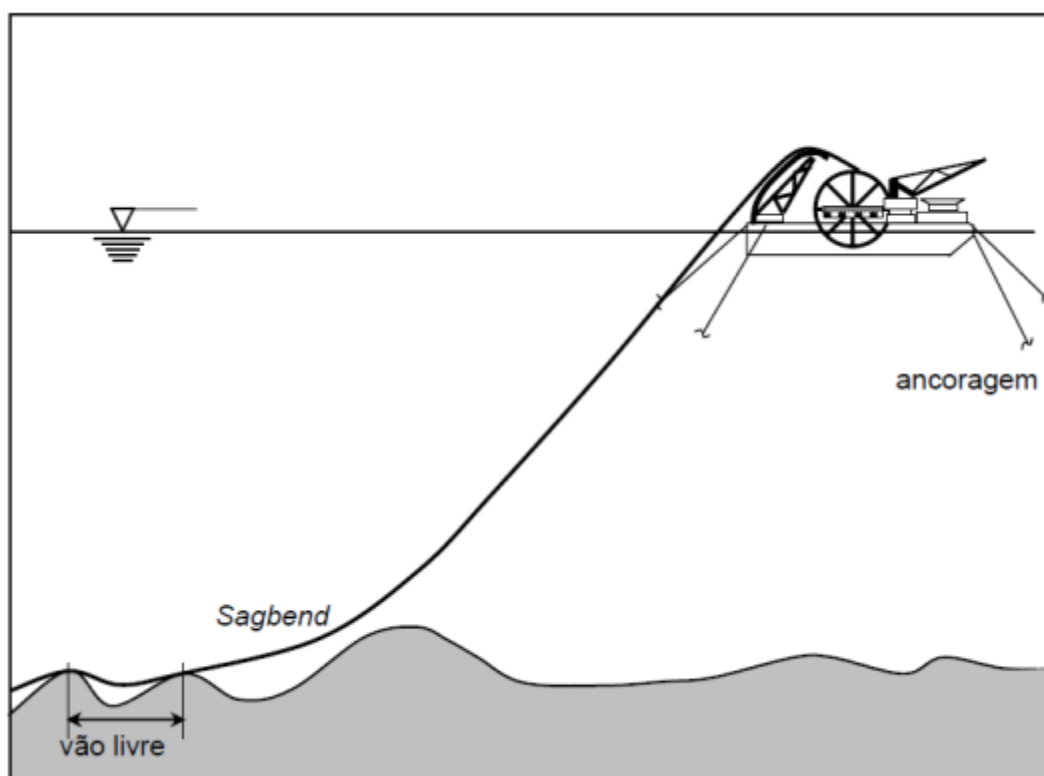


Figura 3- Operação de lançamento - Método Reel-Lay

Além dos métodos de instalação pela superfície, existem ainda os métodos de instalação por arraste, onde o duto é construído em terra, provido de flutuadores e arrastado próximo à superfície ou próximo ao fundo por rebocadores, conforme sejam as condições locais.

Este trabalho basicamente irá utilizar o método de lançamento S-Lay sem ancoragem (funcionando em posicionamento dinâmico) para fazer as análises no duto de 14 polegadas.

3 CRITÉRIOS NORMATIVOS DE PROJETO

Este trabalho utiliza o critério DNV-OS-F101, pois este se refere a normas de dutos submarinos. Serão apresentados logo abaixo todos os estados limites (modos de falha) a serem considerados no projeto de dutos submarinos para todas as fases de um projeto.

3.1 Pressão interna (bursting)

Este critério é relativo a pressão interna nas paredes do duto, devendo satisfazer a seguinte relação, de maneira a conter a pressão interna:

$$p_{Ix} - p_e \leq \frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \gamma_{SC}} \quad (1)$$

Onde,

p_{Ix} pressão interna durante a fase de operação ou pressão durante o teste hidrostático;

p_e pressão externa atuante; (considera-se a pressão hidrostática)

$\gamma_m \gamma_{SC}$ fatores de projeto da norma (referência [1] sec 5 C205 e C206)

A resistência de contenção da pressão é dada por:

$$p_b(t) = \frac{2 \cdot t}{D - t} * f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Onde,

$$f_{cb} = \text{Min} \left[f_y, \frac{f_u}{1.15} \right]$$

p_b = pressão de resistência interna

t = espessura da parede nominal

D = diâmetro externo nominal

f_y = tensão de escoamento do material, a ser utilizado no projeto

f_u = tensão de ruptura do material

3.2 Flambagem Local (Local Buckling)

O critério de flambagem localizada (colapso das paredes do duto) implica em uma deformação bruta na seção transversal. O seguinte critério deve ser satisfeito:

- colapso do sistema (apenas pressão externa);
- propagação da flambagem;
- critério de carga combinada, isto é, interação entre as pressões externa e interna, força axial e momento fletor.

Um grande acúmulo de deformação plástica pode agravar a flambagem local, devendo este efeito ser computado nas análises.

3.2.1 Colapso do sistema

A Resistência característica para a pressão externa segundo referência [1] sec5 D 401 a deve ser calculada como a seguir:

$$(p_c(t) - p_{el}(t)) \cdot (p_c(t)^2 - p_p(t)^2) = p_c(t) \cdot p_{el}(t) \cdot p_p(t) \cdot f_0 \cdot \frac{D}{t} \quad (3)$$

Sendo:

$$p_{el}(t) = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^3} \quad (4)$$

$$p_p(t) = f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \quad (5)$$

$$f_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (6)$$

Sendo:

p_c = pressão característica à colapso

p_{el} = pressão de colapso elástico

p_p = pressão de colapso plástico

f_0 = ovalização da seção

E = módulo de elasticidade do material

ν = coeficiente de Poisson

α_{fab} = fator de fabricação (referência [1] sec 5 B 307)

A pressão externa em qualquer ponto ao longo do duto deve satisfazer os seguintes critérios (verificações do colapso do sistema):

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_c(t)}{\gamma_m \gamma_{SC}} \quad (7)$$

Onde p_{min} é o valor mínimo de pressão interna suportada. Normalmente tomada igual a zero para dutos instalados (as-laid).

3.2.2 Propagação do colapso

A propagação do colapso não pode ser iniciada a menos que a flambagem local tenha ocorrido. No caso em que a pressão externa excede os critérios a seguir, supressores de colapso (bucklearrestors) devem ser instalados e espaçados baseados no custo e nas premissas de projeto. O critério de propagação do colapso é explicitado como segue:

$$p_e < \frac{p_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (8)$$

$$p_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \left(\frac{t_2}{D}\right)^{2,5} \frac{D}{t} < 45 \quad (9)$$

Onde,

p_{pr} pressão de resistência ao colapso propagante

A capacidade dos supressores de colapso (bucklearrestors) depende dos seguintes fatores:

- Resistência à propagação de colapso de um duto adjacente;
- Resistência à propagação de um supressor de colapso (bucklearrestor) infinito;
- Tamanho do supressor de colapso (bucklearrestor).

3.2.3 Flambagem Local – Critério de carregamento combinado

Este critério, talvez seja a principal requisição normativa durante a fase projeto de um duto rígido submarino. Subdivide-se em:

- Condição de carregamento controlado (*Load Controlled Condition*);
- Condição de deslocamentos controlados (*Displacement Controlled Condition*).

Dois tipos de verificações distintas se aplicam a estas duas condições. A condição de carga controlada (LCC) é aquela em que a resposta estrutural é primariamente governada pelas cargas impostas. A condição de deslocamentos controlados (DCC) é aquele em que a resposta estrutural é primariamente governada por

deslocamentos geométricos. Contudo, o LCC pode sempre ser aplicado em qualquer seção do duto.

3.2.3.1 Condição de carregamento controlado (Load Controlled Condition)

Aplicável a seções do duto sujeitas a momento fletor, força axial e pressão interna excessiva, que devem ser projetadas de modo a satisfazer as seguintes condições em todas as seções transversais (estas condições podem ser encontradas na referência [1] Sec 5 D605):

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (10)$$

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd'}(t_2)|}{\alpha_c} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} \cdot S_{Sd'}(p_i t_2)}{\alpha_c} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (11)$$

$$S_p(t) = f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t \quad (12)$$

$$M_p = f_y \cdot (D - t)^2 \cdot t \quad (13)$$

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y} \quad (14)$$

$$\alpha_c = \begin{cases} 1 - \beta & \rightarrow \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ (1 - 3\beta) + \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b} \right) & \rightarrow \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (15)$$

$$\beta = \begin{cases} 0.5 & D/t_2 \leq 15 \\ \left(\frac{60 - D/t_2}{90} \right) & 15 \leq D/t_2 \leq 60 \\ 0 & D/t_2 > 15 \end{cases} \quad (16)$$

Sendo,

$|M_{Sd}|$ -> momento fletor de projeto;

$|S_{Sd}|$ -> força axial efetiva de projeto;

p_i -> pressão interna atuante;

p_e -> pressão externa atuante;

p_b	-> pressão de colapso devido á pressão interna (bursting);
M_p	-> momento fletor para o regime plástico;
S_p	->força axial efetiva para o regime plástico;
α_c	-> parâmetro de tensão de escoamento;
β	-> parâmetro utilizado no critério de carregamento combinado.

Seções do tubo sujeitas a momento fletor, força axial efetiva e excessiva pressão externa devem ser projetados para satisfazer a seguinte equação:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{\min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (17)$$

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}'(t_2)|}{\alpha_c} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S'_{sd}(t_2)}{\alpha_c} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{\min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (18)$$

3.2.3.2 Condição de deslocamentos controlados (Displacement Controlled Condition)

Seções do tubo sujeitas a momento fletor, força axial efetiva e excessiva pressão externa devem ser projetados para satisfazer a seguinte equação (estas equações podem ser encontradas na referência [1] Sec 5 D 605) :

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \gamma_{SC} \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (19)$$

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \cdot \frac{|M'_{Sd}(t_2)|}{\alpha_c} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} \cdot S'_{Sd}(t_2)}{\alpha_c} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \gamma_{SC} \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (20)$$

$\gamma_m = 1,15$ [1] sec 5 C205

$\gamma_{SC} = 1,138$ [1] sec 5 C205

M_{Sd} = momento fletor de projeto

α_c = *parâmetro de tensão de escoamento*

$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y}$ [1] sec 5 C605

f_u = *Tensão última*

f_y = *Tensão de escoamento*

$$\beta = \begin{cases} 0,5 & \text{para } \frac{D}{t_2} < 15 \\ \frac{60 - \frac{D}{t_2}}{90} & \text{para } 15 \leq \frac{D}{t_2} \leq 60 \\ 0 & \text{para } \frac{D}{t_2} > 60 \end{cases}$$

D = *diâmetro externo do duto*

S_{sd} = *efetiva força axial de projeto*

t_2 = *espessura do duto*

$S_p(t_2) = f_y \cdot \pi \cdot (D - t_2) \cdot t_2 \rightarrow$ *capacidade plástica para o duto* [1] Sec 5 D 605

$M_p(t_2) = f_y \cdot (D - t_2) \rightarrow$ *capacidade plástica para o duto* [1] Sec 5 D 605

$M_{sd'} = \frac{M_{sd}}{M_p} \rightarrow$ *momento normalizado* [1] Sec 5 D 605

$S_{d'} = \frac{S_{sd}}{S_p} \rightarrow$ *força efetiva normalizada* [1] Sec 5 D 605

3.3 Critério Simplificado de Lançamento

Existe um critério simplificado para o lançamento aplicável a fase de instalação na DNV-OS-F101 [1] que serve de parâmetro para balizar as análises de lançamento. Este critério basicamente determina o nível de deformações aceitável para cada região do duto durante à instalação em *S-Lay*, quais sejam:

a) Região do Overbend

No *overbend* este critério permite que o nível de deformações no duto esteja de acordo com o Critério I presente na tabela a seguir, quando da realização somente da análise estática. Para a avaliação das deformações devem ser considerados os efeitos de força axial, momento fletor e reação nos roletes.

Durante a análise dinâmica, o nível de deformações deve estar de acordo com o Critério II, considerando também fatores de concentração de tensões, tais como *bucklearrestors*, etc.

Tabela 1 – critério simplificado - DNV-OS-F101 [1]

Critério	X70	X65	X60	X52
I	0.270%	0.250%	0.230%	0.205%
II	0.325%	0.305%	0.290%	0.260%

b) Região do Sagbend

Na região do sagbend basicamente é definida uma tensão admissível, dentro da qual o duto não estará suscetível a falhas, como segue:

$$\sigma_{eq} < 0,87 \cdot f_y \quad (21)$$

4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

Na análise de sistemas offshore é importante avaliar os carregamentos ambientais atuantes nos dutos e na própria unidade flutuante. Os carregamentos mais importantes são: Correnteza, ondas e vento.

Os carregamentos ambientais são responsáveis por imprimir esforços adicionais nas linhas e dutos o que pode causar danos se o dimensionamento desses não for correto.

A natureza dos carregamentos é aleatória, porém para a análise podemos estimar carregamentos de projeto de acordo com a região onde a unidade flutuante esta sendo analisada. De acordo com a análise dos esforços pode-se avaliar a necessidade de se utilizar outro tipo de dutos. A seguir iremos listar os modelos usados para representação de ondas e do método utilizado para as forças geradas pelas ondas, correntezas e vento.

4.1 ONDAS

As ondas são pulsos energéticos que se propagam através do meio fluido através da influência gravitacional, vento e outros não importantes para nossa análise . As ondas geradas pelos ventos podem ser classificadas em duas categorias básicas: sea e swell.

SEA: são geradas por ventos locais. Ondas do tipo sea são irregulares; ondas altas são seguidas imprevisivelmente por ondas pequenas e vice versa. Elas possuem cristas de ondas individuais que parecem propagar-se em direções diferentes com dezenas de graus de desvio da direção principal. As cristas são pontiagudas e algumas vezes pequenas ondas podem ser observadas sobre estas cristas.

SWELL: são ondas geradas que se propagam fora da área e do vento que foram geradas, estas não são mais dependentes do vento e podem se propagar por vários quilômetros de distância através de áreas onde os ventos estão calmos. Ondas individuais são mais regulares e as cristas são mais abauladas do que aquelas do tipo sea. Os comprimentos das cristas são mais longos. A altura da onda também é mais previsível.

Ondas formadas por vento são irregulares e podem ser vistas como uma superposição de muitas componentes de ondas regulares e harmônicas cada uma com sua própria amplitude, comprimento, frequência, e direção de propagação.

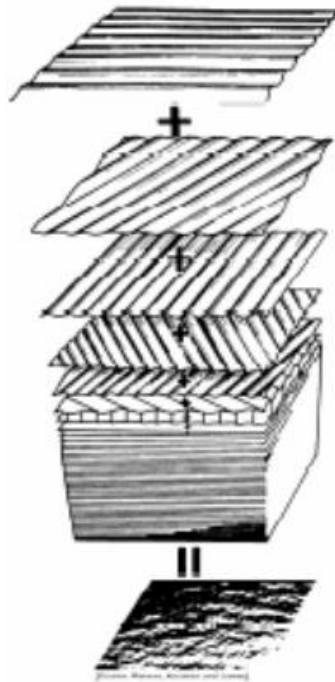


Figura 4 – superposição de várias ondas regulares

Para a análise de ondas usa-se a teoria linear, juntamente com a Extrapolação de Wheeler. A função potencial de onda usando a Extrapolação de Wheeler pode ser vista abaixo:

$$\phi_w = \frac{\xi_a g}{\omega} \frac{\cosh kh \left(\frac{h-h'+z_s}{h+z_s} \right)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (22)$$

Sendo: h' = profundidade do ponto medido da superfície da onda.

4.2 CORRENTEZA

Correntezas são fenômenos ambientais gerados pelos ventos atuantes na superfície do mar, por efeitos de marés, e pela variação da pressão atmosférica, a correnteza esta presente tanto na superfície quanto no fundo do oceano; as correntezas geram forças tanto na unidade flutuante quanto nas linhas.

As correntezas em geral são consideradas carregamentos horizontais que podem atuar em varias direções e que possuem um perfil de velocidade que varia ao longo da profundidade.

As forças geradas pelas correntezas podem ser consideradas estáticas e são calculadas através da equação de Morison (mostrada anteriormente), vale lembrar que para corpos esbeltos como risers e umbilicais pode existir o fenômeno dinâmico da vibração induzida por vórtices (VIV).

Na análise dos carregamentos atuantes em um sistema cada tipo de carregamento(vento, correnteza e onda), são considerados separadamente no entanto, em alguns casos mais complexos, a interação física entre estes componentes não pode ser desprezada, principalmente quando se tem velocidades de corrente elevadas.

4.3 VENTO

Ventos são carregamentos ambientais que ocorrem geralmente de forma aleatória, eles atuam na parte fora da água da estrutura analisada. Os carregamentos gerados ventos podem ser classificados em duas parcelas:

Parcelas Estáticas: são constantes ao longo do tempo e produzem carregamentos estáticos.

Parcelas Dinâmicas: não constantes ao longo do tempo e são somadas as parcelas estáticas do vento, geram movimentos de baixa frequência.

A consideração única da parcela estática é suficiente em projetos de estruturas fixas e não-esbeltas. Por outro lado, a parcela dinâmica é significativa em estruturas complacentes, visto que o espectro de vento tem energia suficiente para excitá-las nas frequências próximas a sua frequência natural (baixas frequências e períodos longos).

Os perfis de velocidade para uma dada região é obtida através de análises estatísticas de medições feitas no campo, e geralmente são feitos 1 hora de medição a uma altura de 10m.

Como as parcelas dinâmicas do carregamento do vento são aleatórios, ele é geralmente representado com um espectro de energia conforme as ondas, Em projetos offshore, a utilização do espectro de vento descrito na referência [10] para o cálculo dos esforços é adequada.

A referência [10] fornece também uma expressão para o cálculo dos esforços gerados pelo vento, conforme visto abaixo:

$$F_{vento} = \frac{1}{2} \rho u^2 C_s A \quad (23)$$

Sendo:

ρ = massa específica do ar;

u = velocidade do vento;

C_s = Coeficiente de forma (Ex: $C_s = 1.5$ (vigas); $C_s = 0.5$ (seções circulares))

A = Área obstruída pelo vento

5 Metodologias de análise de sistemas offshore

Com o crescente aumento de atividades ligadas ao petróleo em águas profundas surgiram novas formas de se analisar o sistema offshore diferentes das formas tradicionais de análise.

Atualmente existem três formas de se analisar a interação entre as linhas e a unidade flutuante em um sistema offshore, são elas:

- Metodologia acoplada
- Metodologia desacoplada (forma tradicional)
- Metodologia Híbrida

Basicamente estas metodologias se diferem pelo tipo de formulação utilizada ou pelo nível de acoplamento de sua implementação computacional.

A seguir vão ser apresentadas as três metodologias porém a usada para este projeto será a desacoplada:

5.1 *Metodologia Desacoplada*

A Metodologia Desacoplada, também conhecida como Método Clássico, consiste na metodologia mais tradicional utilizada em projetos de sistemas flutuantes. Neste tipo de análise, empregam-se ferramentas computacionais baseadas em formulações desacopladas, sendo que o modelo hidrodinâmico da unidade flutuante não leva em conta o comportamento dinâmico não-linear das linhas.

O uso da metodologia desacoplada pode induzir a erros quando se tem uma grande quantidade de linhas ou em águas profundas. O erro também ocorre quando se tem unidades flutuantes pequenas, pois nestas a influencia da linha é maior. A metodologia desacoplada tem resultados aceitáveis quando se trabalha em águas rasas com poucas quantidades de linhas.

5.2 Metodologia Acoplada

Nos últimos anos estão sendo usadas plataformas flutuantes com um número de risers cada vez maior buscando otimizar a exploração do petróleo em águas profundas. Em muitos projetos offshore o uso da análise desacoplada se torna inviável pois suas simplificações implicariam em erros.

A formulação acoplada utiliza métodos de representação da unidade flutuante juntamente com as linhas. O casco é representado por um modelo hidrodinâmico enquanto as linhas são representados por modelos de elementos finitos. Considerando os carregamentos que a plataforma estará sujeita são realizadas análises no domínio do tempo para considerar a interação não-linear do comportamento hidrodinâmico do casco com o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas.

A metodologia acoplada sem dúvida fornece resultados mais confiáveis do que as metodologias desacopladas pois a interação entre o casco e o dutos são considerados diretamente. Porém uma desvantagem de se usar essa metodologia é o fato da mesma requerer malhas refinadas e análises mais demoradas gerando um alto custo computacional.

5.3 Metodologia Híbrida

As metodologias de projeto híbridas são estratégias que combinam as vantagens das formulações desacopladas e das formulações acopladas (com vários níveis de acoplamento). Basicamente, os movimentos da unidade flutuante são analisados de forma acoplada e a resposta estrutural das linhas de forma desacoplada.

6 Descrição do modelo utilizado

Antes de descrever o modelo utilizado é importante falar sobre o programa Situa-Prossim que é um programa desenvolvido pelo LAMCSO (Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore) que é de propriedade da Petrobrás.

SITUA - Unidade Flutuante 1 BGL1

Arquivo Opções de Desenho Edição Geração

Frontal - YZ Lateral - XZ Superior - XY Múltipla 3D Propriedades

Geometria Hidrodinâmica Movimento **Conexão**

Adicionar Excluir CONEXÕES

ind	X (m)	Y (m)	Z (m)	Turret
1	-12,0640	-13,2400	9,5000	Não

OK Cancelar

C:\SITUA\casco\BGL1.mdl

SITUA - Linha - 1

Arquivo Desenho Preferências Copiar Ferramentas Otimização de Riser

LinHA1 Ident **linhura** Classe Riser/Duto Prof(m) 25,0000

Conexões Segmentos Bóias Fundo Catenária Obstac. OffSet/HookUp Minimizar

☐ Delatada ☐ Adicionar ☐ Excluir ☐ MALHA Editar Tipos

Segmento	Nome	Comp. Seg(m)	Malha Int(m)	Malha Ext(m)	Nome do Tipo
1A	LAYBARGE	100,000	0,1	0,1	Flex_sem_concreto(F)
2B		450,000	1	0,1	Flex_sem_concreto(F)

Elementos Finitos

Elementos

Tipos de Elemento

☒ **Pórtico**

☐ Híbrido

☐ Não-Linear Fítico

☐ **Treliça**

☐ Modificada

☒ Trações Iniciais

☐ por nós ☐ por elementos

☒ Curvaturas Iniciais

☐ por nós ☐ por elementos

Ativar modelo de contato da Linha com :

☐ ela mesma ☐ as outras ☒ casco

☐ Cálculo de termos de massa rotacional

☐ Ruptura da Linha

Início Ruptura (seg.) : 0

Fim Ruptura (seg.) : 0

Elemento Rompido : 1817

☒ Ativar hidrodinâmica não linear na linha

Restrições Nodais :

Nó	DesX	DesY	DesZ	RotX	RotY	RotZ
1 B	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
1819 A	UF	UF	UF	UF	UF	UF

☐ Expandir

Definição da Catenária

☒ Tração Total (ton) 15,00000

☐ Força Horizontal (ton)

☐ Projecção Horizontal (m) ☐ Comp Var

☐ Ang. de Topo c/ Vertical ☒ Extensivel

29

O programa também permite modelar condições ambientais atuantes no casco e duto, no presente trabalho as condições ambientais usadas foram uma correnteza de 1m/s e uma onda que tinha altura significativa de 2,5m e períodos de 5, 6 e 8s.

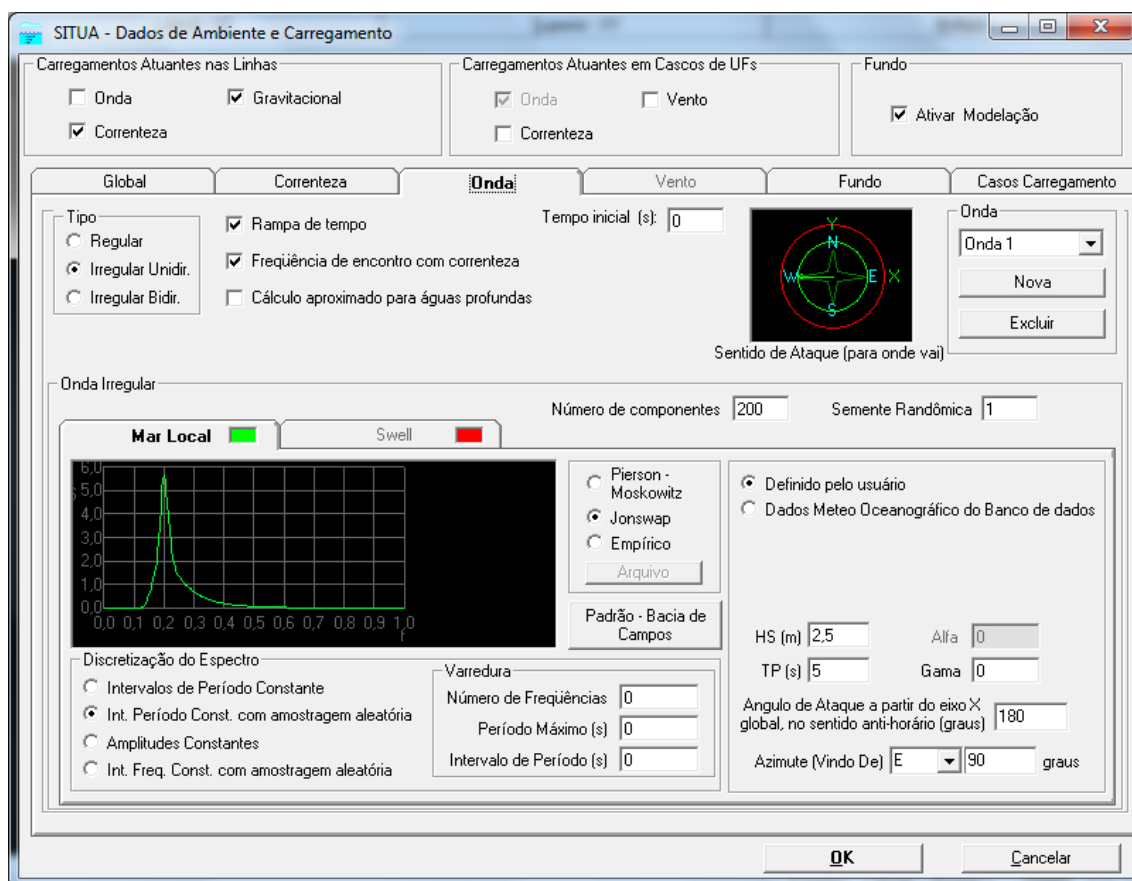


Figura 7 - Tela de modelagem das condições ambientais

Nesta etapa é importante frisar algumas características importantes do modelo de plataforma utilizado no programa ao qual ele foi usado. A plataforma de lançamento que opera em posicionamento dinâmico tem as seguintes características: Comprimento = 144,22m, Pontal = 8,534m, Boca = 30,48m e Calado = 5.182m. O modelo tridimensional juntamente com o stinger pode ser observado abaixo:

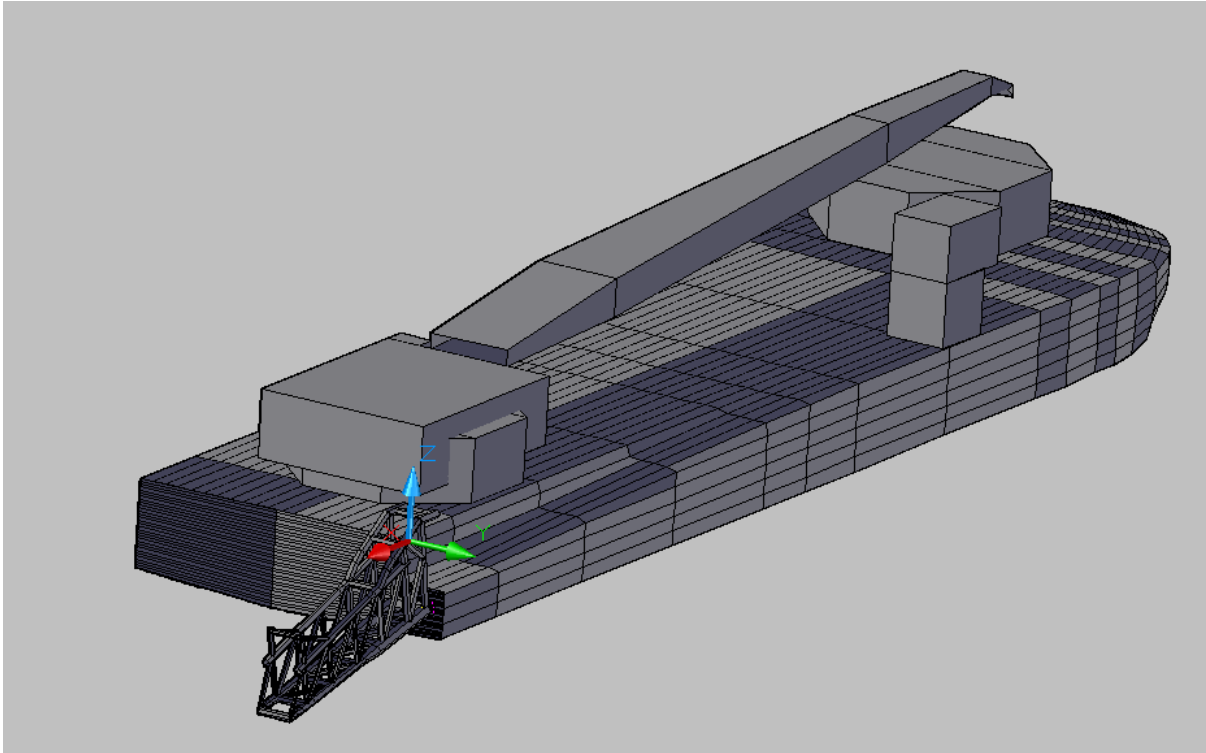


Figura 8 – Plataforma de lançamento de duto submarino

A rampa de lançamento possui um comprimento de 49 metros e o stinger tem um comprimento de 19,71m. Os raios de curvatura são variados por isso não serão aqui descritos. Os roletes tem as seguintes propriedades: quantidade de berços de roletes na rampa = 10, quantidade de berços de roletes no stinger= 4, diâmetro do rolete = 0.35m, Comprimento do rolete = 1m. A figura abaixo ajuda a compreender as características geométricas dos berços de roletes da rampa do stinger.

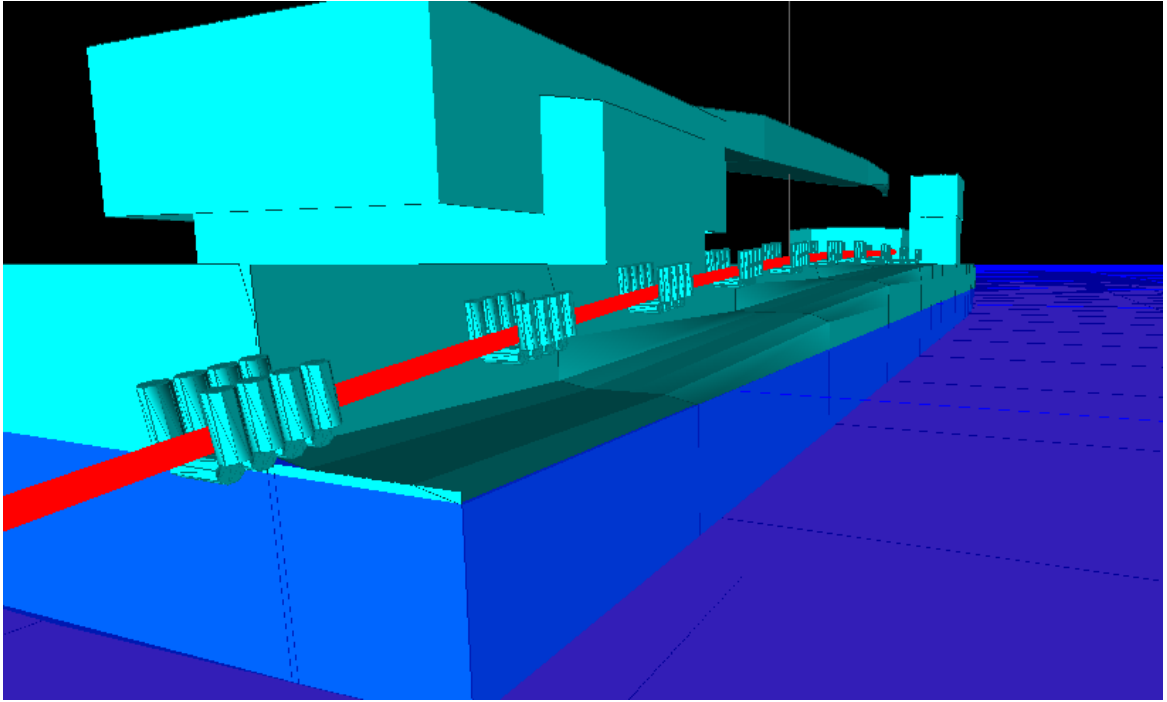


Figura 9 – Berços dos roletes

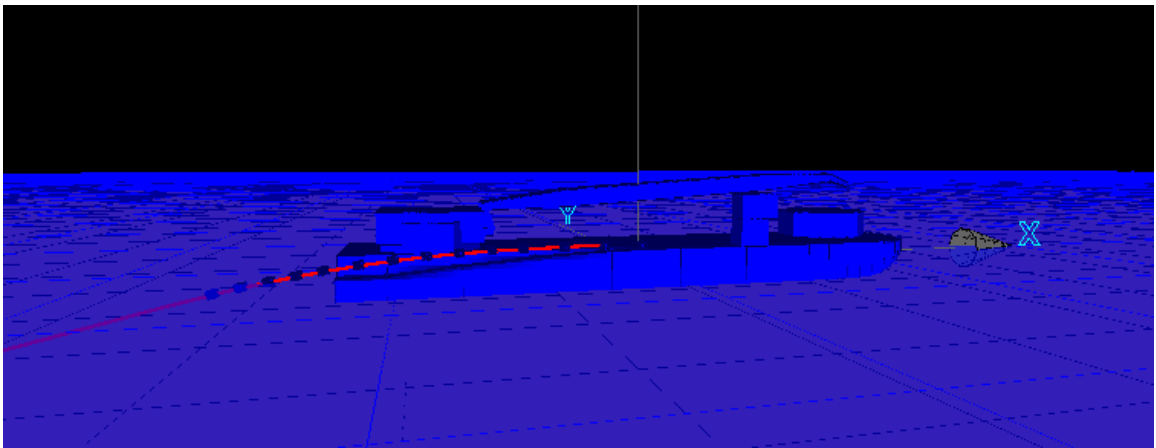


Figura 10 – Vista lateral do modelo

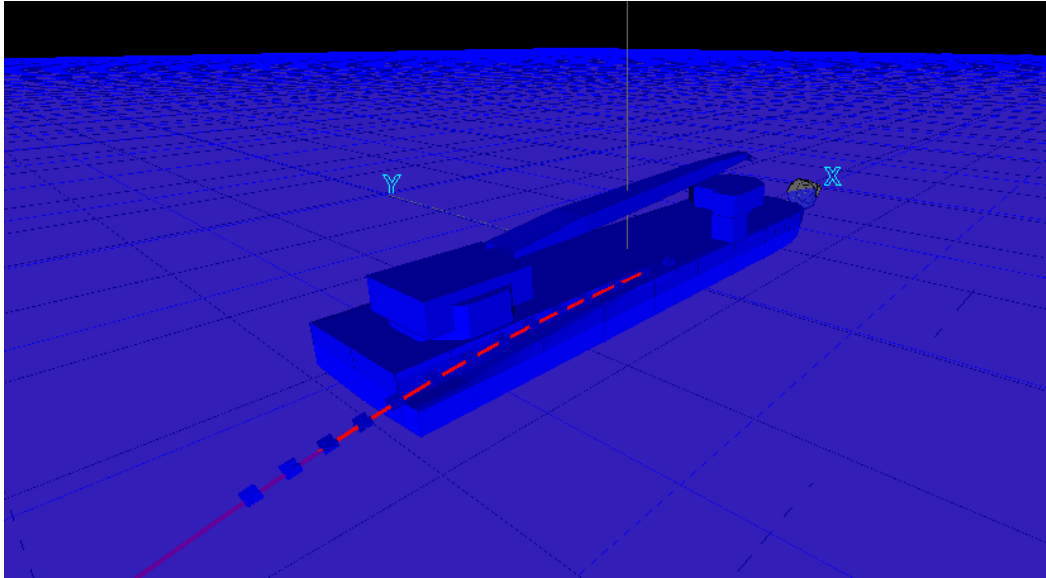


Figura 11 – Vista geral do modelo

7 Cálculo das propriedades físicas do Duto utilizado

O duto a ser analisado no presente trabalho é de 14 polegadas (355.6mm) de diâmetro externo e tem uma espessura de parede de 0.625 polegadas (15.835mm). Nesse duto também existe uma espessura de revestimento anti-corrosivo de 0.146 polegadas (3.7mm). Neste duto não existe camada de concreto pois seu peso é suficientemente maior que o empuxo como explicitado posteriormente. Importante frisar que o modelo de elementos finitos para o duto tem 0,1m a 1m de comprimento por elemento.

O aço utilizado para o cálculo das propriedades físicas do duto foi o Aço X60, logo abaixo as propriedades deste aço são mostradas:

$$\rho_s = 7850 \frac{Kg}{m^3} \rightarrow \text{densidade do aço}$$

$$\nu = 0.3 \rightarrow \text{coeficiente de poisson}$$

$$E = 207Gpa \rightarrow \text{módulo de elasticidade}$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \rightarrow \text{módulo de elasticidade transversal}$$

$f_y = 414MPa$ -> tensão de escoamento (segundo API)

$f_u = 517MPa$ -> tensão última (segundo API)

Para o revestimento anti-corrosivo a única propriedade usada foi a densidade, a saber:

$$\rho_{ac} = 980 \frac{kg}{m^3}$$

A partir das informações anteriores, o cálculo do diâmetro interno pode ser calculado usando a expressão abaixo:

$$d_s = D_s - 2.t_s$$

Onde:

d_s -> diâmetro interno

D_s -> diâmetro externo

t_s -> espessura do duto

$$\text{Então: } d_s = D_s - 2.t_s \quad \rightarrow \quad d_s = 14 - 2*0.625 \quad \rightarrow \quad d_s = 12.75 \text{ pol} = 323.85 \text{ mm}$$

A área da seção transversal pode ser dada pela seguinte expressão:

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot (D_s^2 - d_s^2)$$

Então:

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot (D_s^2 - d_s^2) \quad \rightarrow \quad A_s = \frac{\pi}{4} \cdot (14^2 - 12.75^2) \quad \rightarrow \quad A_s = 26.262 \text{ pol}^2 = 0.017 \text{ m}^2$$

A inércia da seção transversal em relação ao eixo x e y pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$I_{sx} = \frac{\pi}{64} \cdot (D_s^4 - d_s^4) \quad \rightarrow \quad I_{sx} = 2.45 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$\text{e } I_{sx} = I_{sy}$$

A inércia polar da seção pode ser calculada usando a seguinte expressão:

$$J_s = I_{sx} + I_{sy} \quad \rightarrow \quad J_s = 4.899 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

O peso específico do aço pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g \quad \rightarrow \quad \gamma_s = 7.85 \cdot 10^3 \frac{Kgf}{m^3}$$

O peso por metro do aço pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$P_{SPM} = \gamma_s \cdot A_s \quad \rightarrow \quad P_{SPM} = 133.003 \frac{kgf}{m}$$

O peso específico do revestimento anti-corrosivo pode ser calculado usando a expressão:

$$\gamma_{ac} = \rho_{ac} \cdot g \quad \rightarrow \quad \gamma_{ac} = 980 \frac{kgf}{m^3}$$

A área da seção transversal do revestimento anti-corrosivo pode ser calculado usando a expressão:

$$A_{ac} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(D_s + 2t_{ac})^2 - D_s^2 \right] \quad \rightarrow \quad A_{ac} = 4.176 \cdot 10^{-3} m^2$$

O peso por metro do revestimento anti-corrosivo pode ser calculado usando a expressão:

$$P_{acpm} = \gamma_{ac} \cdot A_{ac} \quad \rightarrow \quad P_{acpm} = 4.093 \frac{kgf}{m}$$

O peso total do duto considerando o aço mais o revestimento anti-corrosivo pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$P_{duto pm} = P_{spm} + P_{acpm} \quad \rightarrow \quad P_{duto pm} = 0.151 \frac{tonf}{m}$$

O diâmetro hidrodinâmico será a soma do diâmetro externo mais 2 vezes a espessura do revestimento anti-corrosivo:

$$HD = D_s + 2t_{ac} \quad \rightarrow \quad HD = 363 mm$$

Pode calcular a área hidrodinâmica do duto:

$$HSAR = \frac{\pi}{4} HD^2 \quad \rightarrow \quad HSAR = 0.103 m^2$$

Sendo a massa específica da água $\rho_{\text{água}} = 1.025 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$, pode calcular o empuxo

por metro no duto:

$$\text{Empuxo} = \rho_{\text{água}} \cdot \text{HSAR} \rightarrow \text{Empuxo} = 0.106 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

O peso do duto na água pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$P_{\text{duto_água}} = P_{\text{duto_{pm}}} - \text{Empuxo} \rightarrow P_{\text{duto_água}} = 0.04504 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Portanto os parâmetros calculados que servem de entrada para o software de elementos finitos Situa-Proxim podem ser observados na figura abaixo:


Flexível	
Nome	Flex_sem_concreto
Cor	
Diâmetro Externo Nominal (m)	0,3556
Diâmetro Interno Nominal (m)	0,32385
Coefficiente de Poisson	0,3
Rigidez Axial (EA-ton)	394225,804056
Rigidez Flexional (EI-ton*m²)	5699,77045
Rigidez Torsional (GJ-ton*m²)	4384,43881
Coefficiente de Endurecimento	0
Tensão de Escoamento (ton/m²)	0
Tração Axial Máxima (ton)	0
Raio de Curvatura Mínimo(m)	0
Peso no Ar Vazio (ton/m)	0,15100
Peso na Água Vazio (ton/m)	0,04504
Peso no ar do Flutuador (ton/m)	0
Empuxo do Flutuador (ton/m)	0
Coefficiente de Inércia (CM)	2
Coefficiente de Arraste Normal (CDN)	1,2
Coefficiente de Arraste Longitudinal (CDL)	0
Coef. de Massa Adicionada (CA) obs: CA=0 -> CA = CM-1	1
Diâmetro Hidrodinâmico (HD-m)	0,363

Figura 12 –Parâmetros de entrada do software de elementos finitos Situa-Proxim

8 Análise de Tensões e Deformações

8.1 Introdução

Antes de começar as análises numéricas é importante esclarecer claramente as regiões sagbend e overbend no modelo numérico. A região do sagbend está compreendida da distância 0 da ancora até a distância 493m, a partir dessa distância o duto já está na região do stinger que foi definida como overbend (vai da distância 493m até 550m). O gráfico a seguir ajuda a compreender:

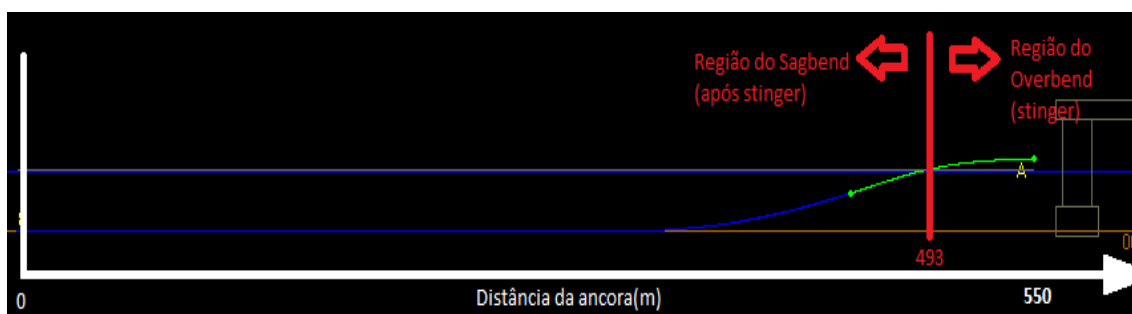


Figura 13 – Gráfico mostrando região do sagbend e overbend

8.2 Análises Estáticas

A seguir serão gerados modelos usando o método da relaxação dinâmica para as profundidades de 25m, 35m e 45m. Esses modelos também terão diferentes raios de curvatura da rampa e stinger. Após a geração dos modelos uma análise estática considerando apenas o peso do duto será feita e gerado gráficos que relacionam a distância da âncora com a Máxima Tensão de Von-Misses ou Deformação.

8.2.1 Profundidade 25m

Para a profundidade de 25m foi verificada a tensão de Von-Misses e deformações para a configuração estática para os seguintes raios da rampa-stinger: 210m, 220m, 230m, 240m, 250m e 260m.

Vale lembrar que o critério de lançamento simplificado é aqui utilizado, onde os níveis de tensão não deveriam ultrapassar $0.87 f_y$ (360.18Mpa) e os níveis de deformação não deveriam ultrapassar 0.23% na análise estática para o aço X60. Os resultados se encontram logo abaixo:

8.2.1.1 Rampa220m(análise estática)

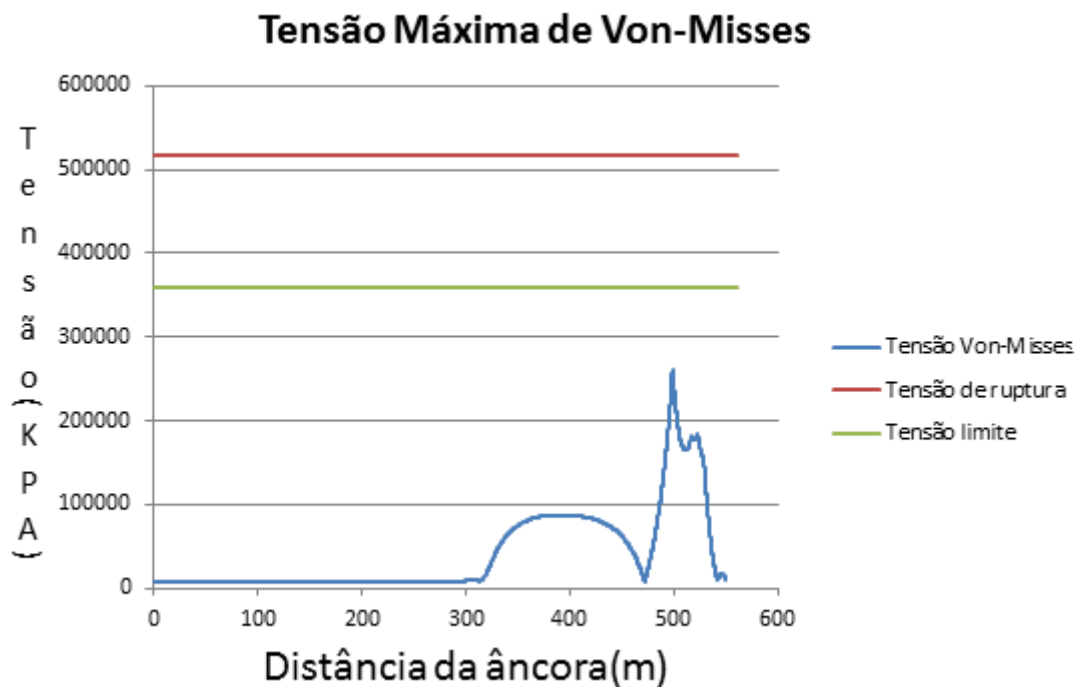


Gráfico 1 – Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 220m e profundidade 25m

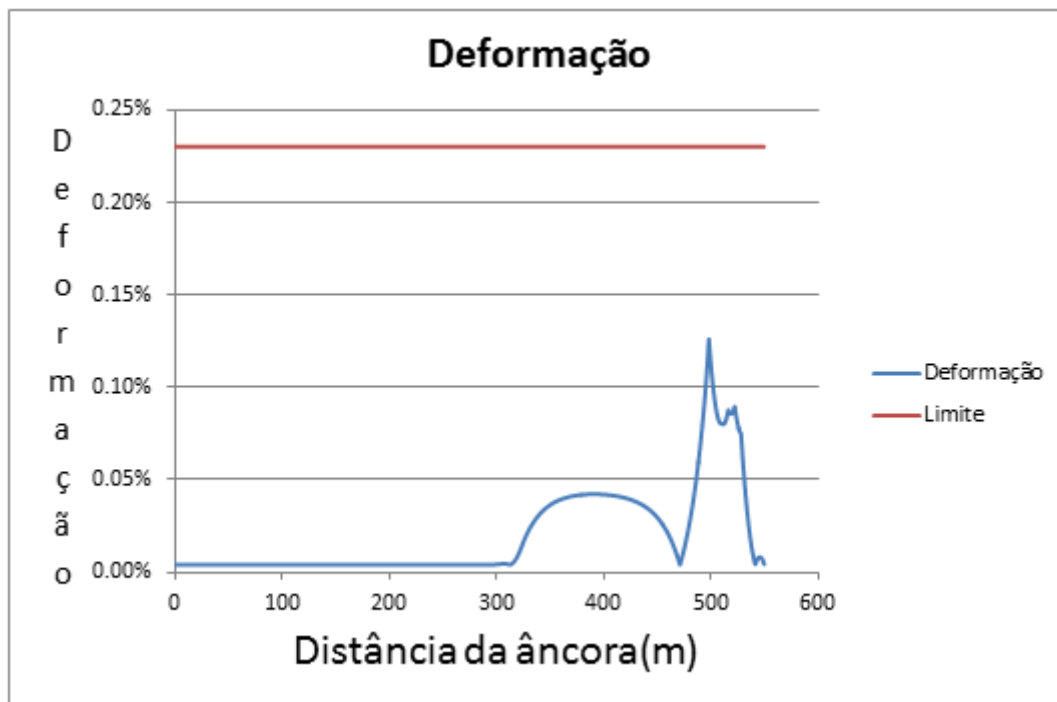


Gráfico 2 – Deformação para raio de curvatura 220m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (260849KPa), e o seu valor difere dos outros que estão perto dele. Esse ponto onde ocorre a tensão máxima fica bem próximo ao último rolete do stinger estando ainda dentro do stinger. Isso faz concluir que a região crítica é a próxima ao último rolete.

8.2.1.2 Rampa 230m (análise estática)

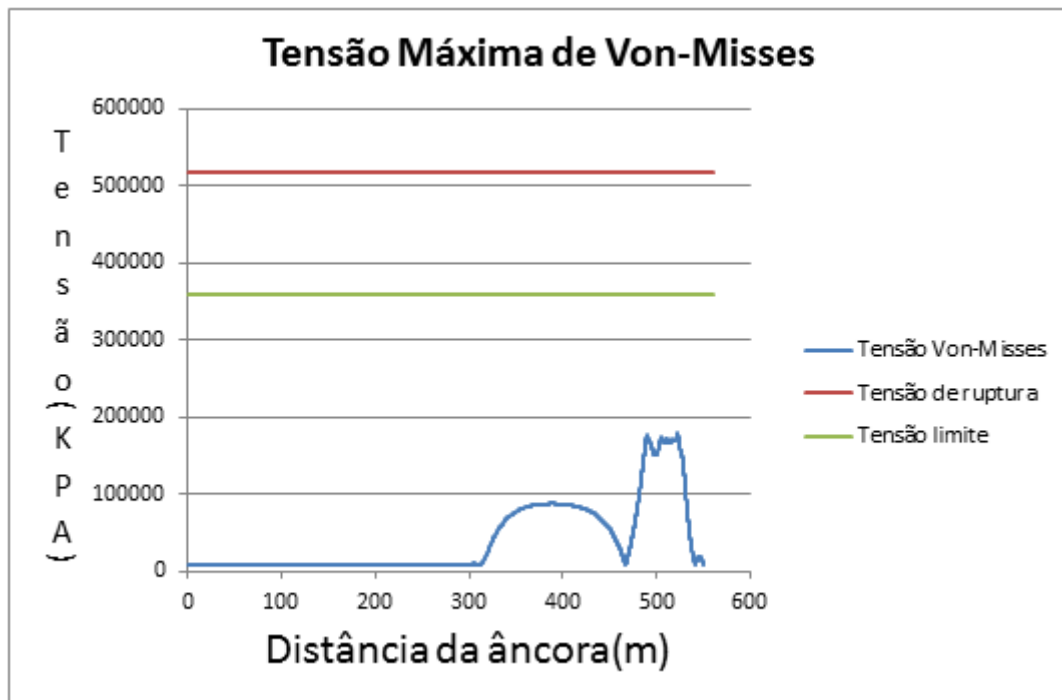


Gráfico 3– Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 230m e profundidade 25m

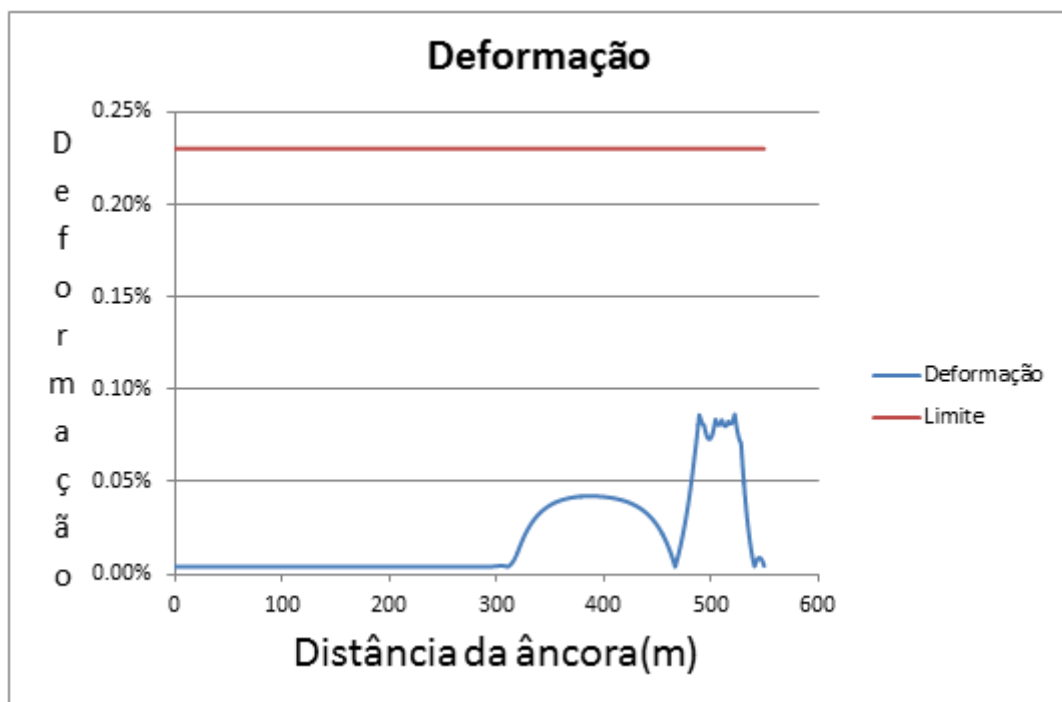


Gráfico 4– Deformação para raio de curvatura 230m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (178932KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção.

8.2.1.3 Rampa240m(análise estática)

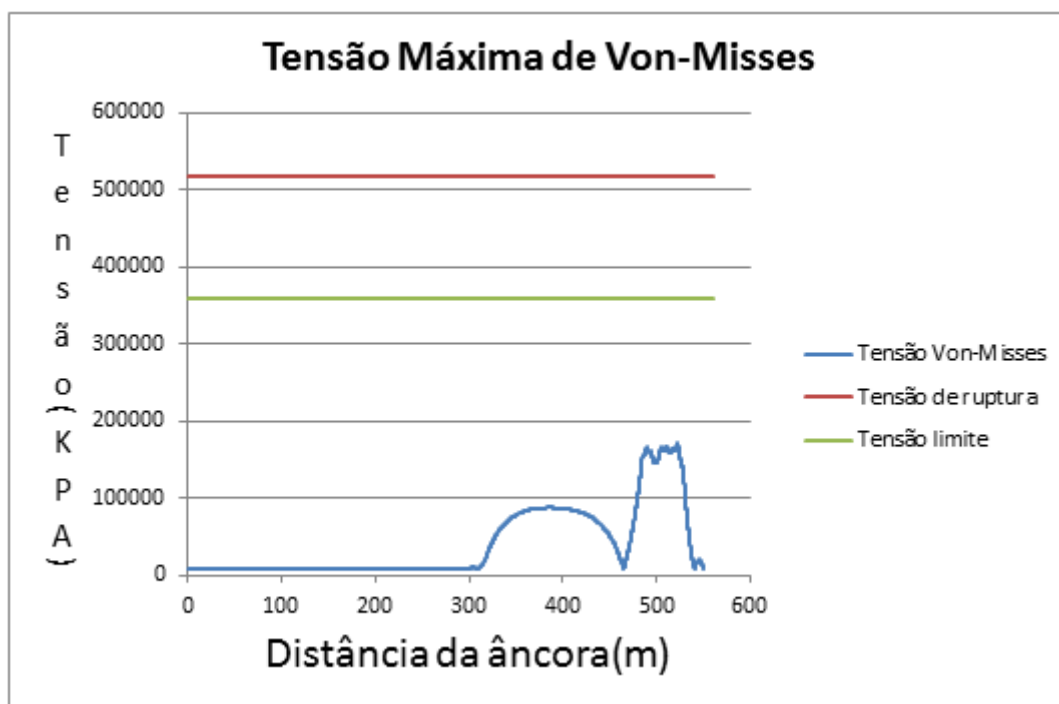


Gráfico 5 – Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 240m e profundidade 25m

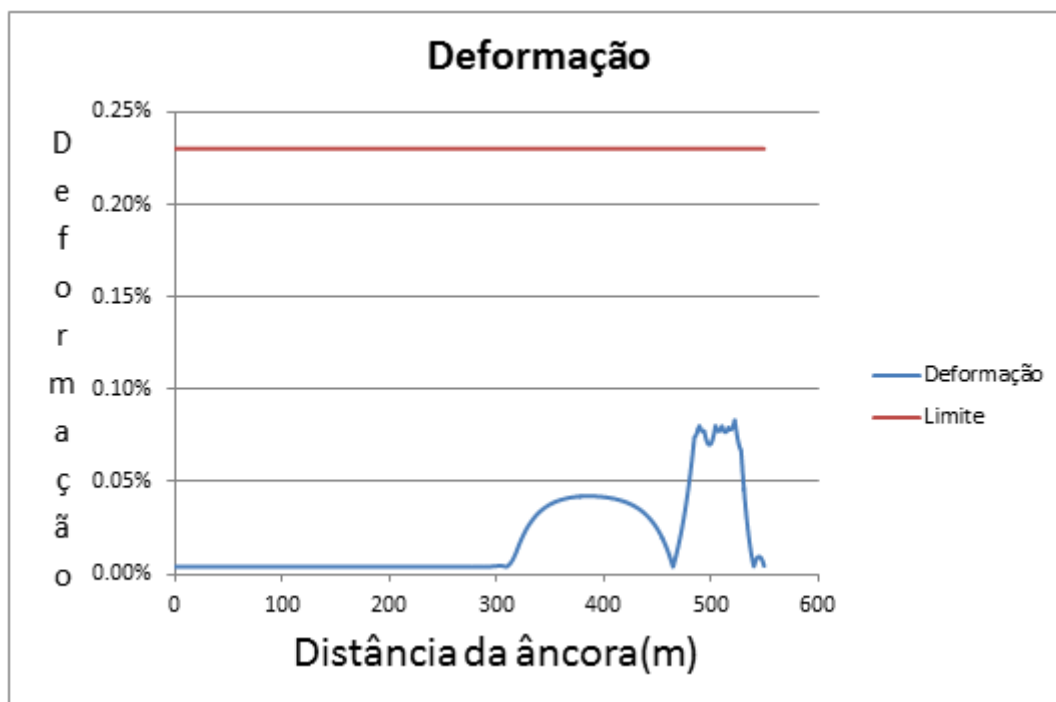


Gráfico 6— Deformação para raio de curvatura 240m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa(172601KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção.

8.2.1.4 Rampa 250m (análise estática)

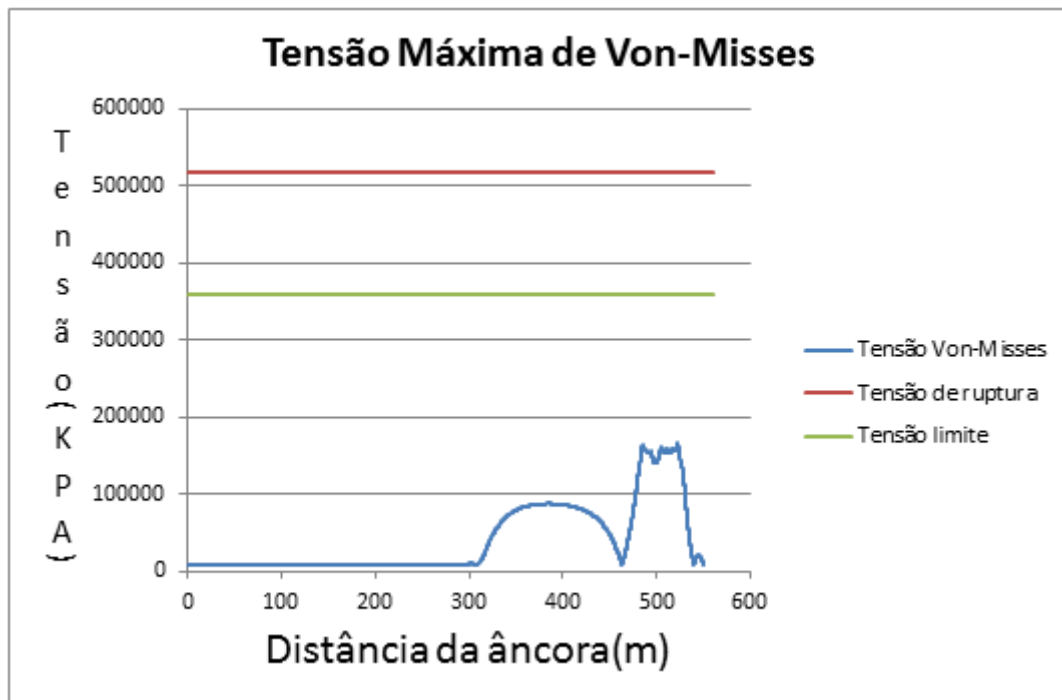


Gráfico 7– Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 250m e profundidade 25m

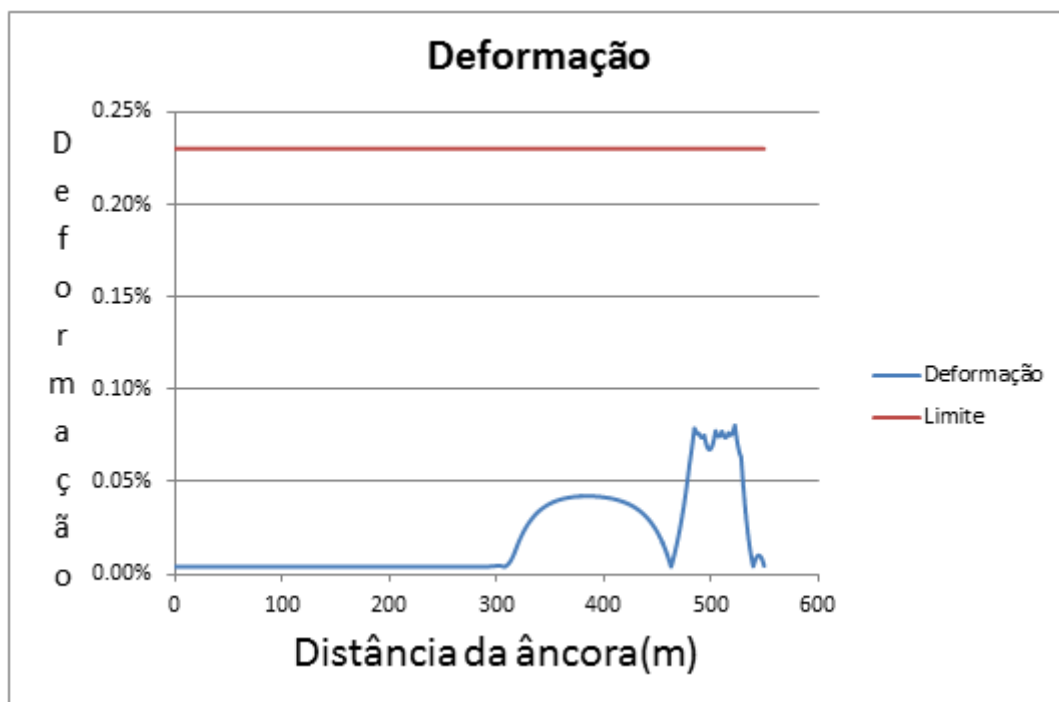


Gráfico 8 – Deformação para raio de curvatura 250m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa(166756KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar

semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Pode-se perceber que os valores máximos da deformação tem a tendência de diminuir com o aumento do raio rampa-stinger.

8.2.1.5 Rampa 260m (análise estática)

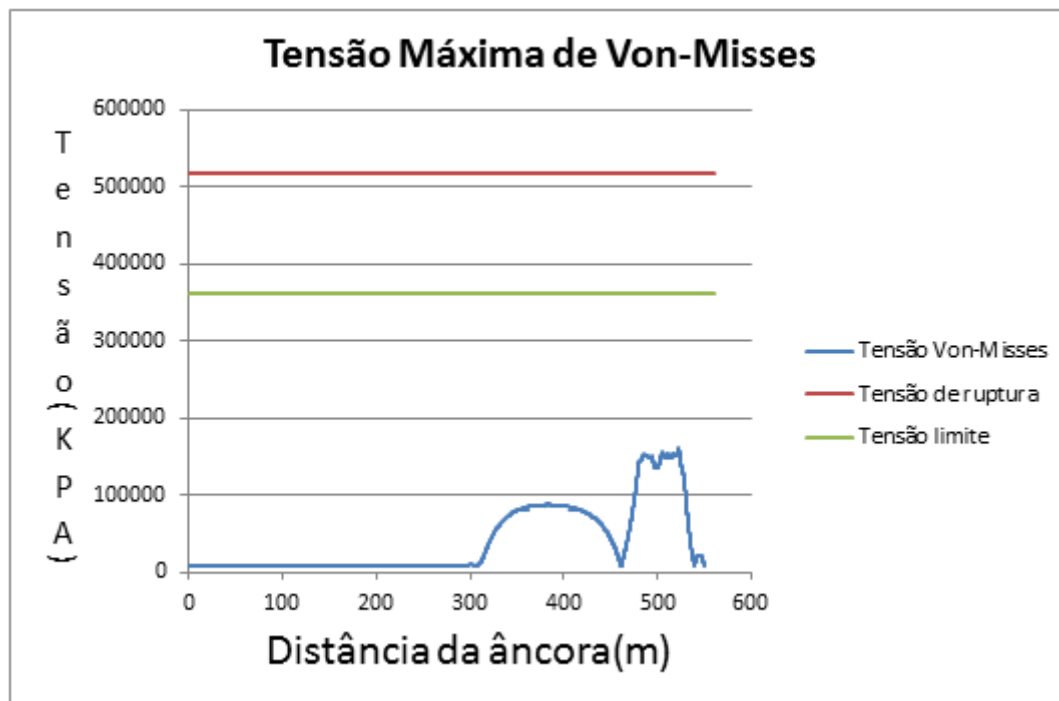


Gráfico 9 – Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 260m e profundidade 25m

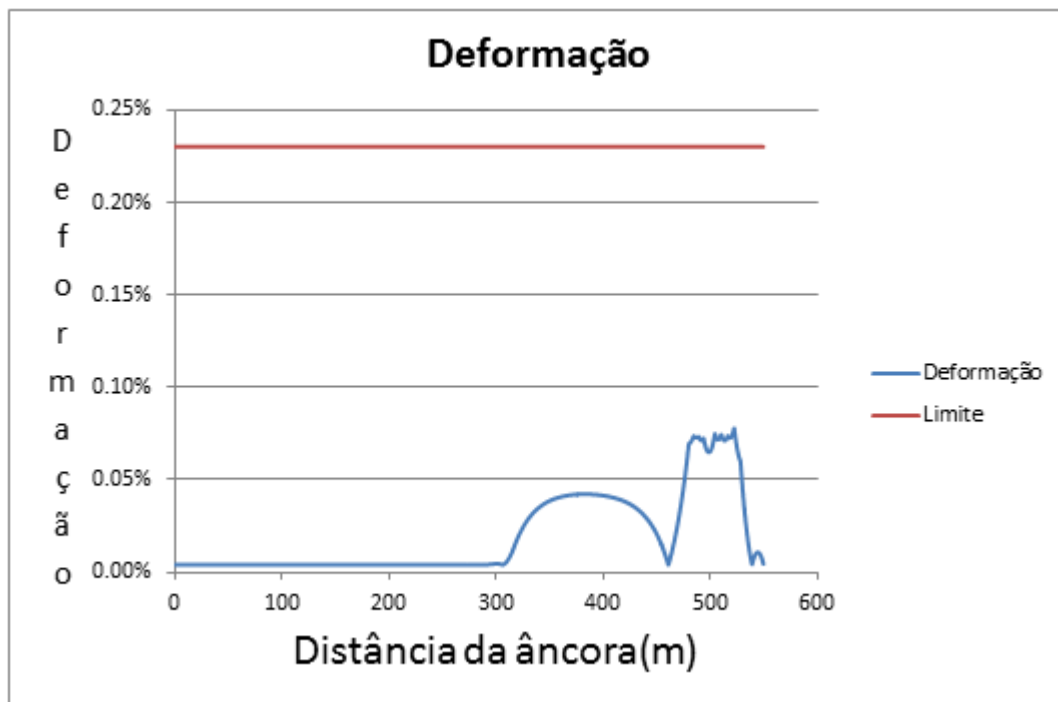


Gráfico 10 – Deformação para raio de curvatura 260m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa(161184KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Pode-se perceber que os valores máximos da deformação tem a tendência de diminuir com o aumento do raio rampa-stinger.

8.2.1.6 Rampa 270m (análise estática)

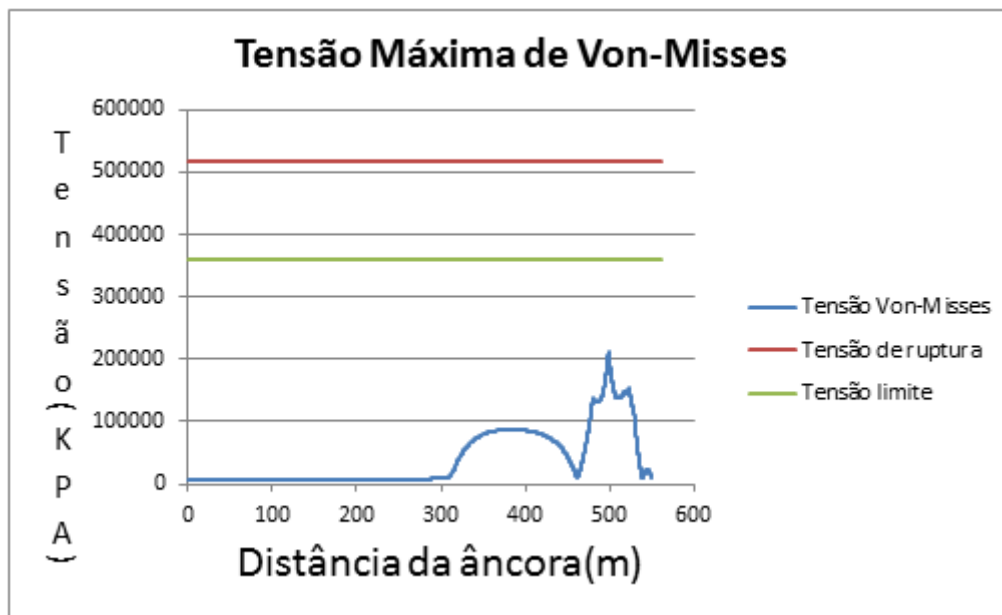


Gráfico 11 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 270m e profundidade 25m

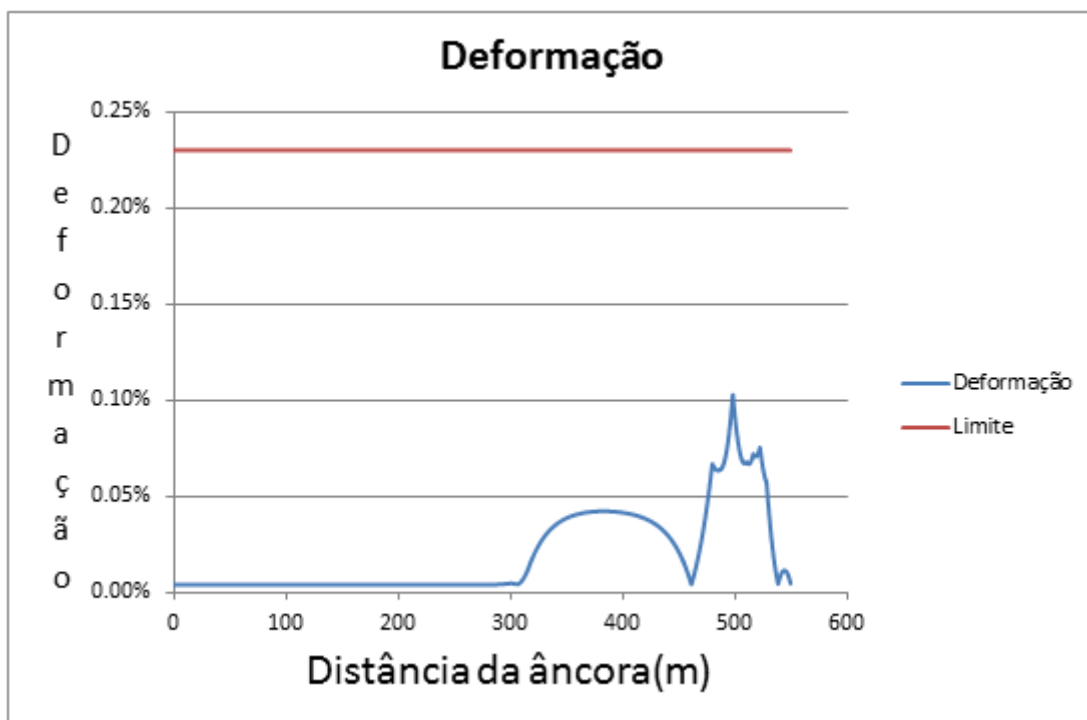


Gráfico 12 - Deformação para raio de curvatura 270m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa(212758KPa), sendo que seu valor difere consideravelmente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um

patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Pode-se perceber que a partir desse ponto o pico de tensão aumenta consideravelmente em relação aos raios de curvatura anterior.

8.2.1.7 Rampa 280m (análise estática)

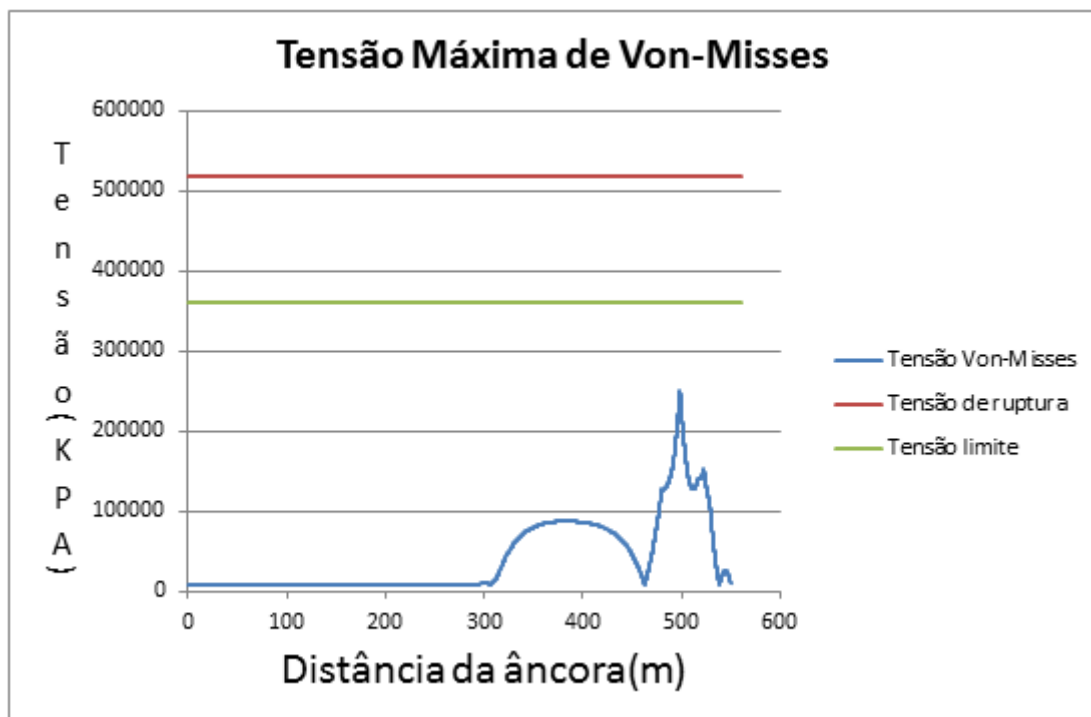


Gráfico 13 - Tensão de Von-Mises para raio de curvatura 280m e profundidade 25m

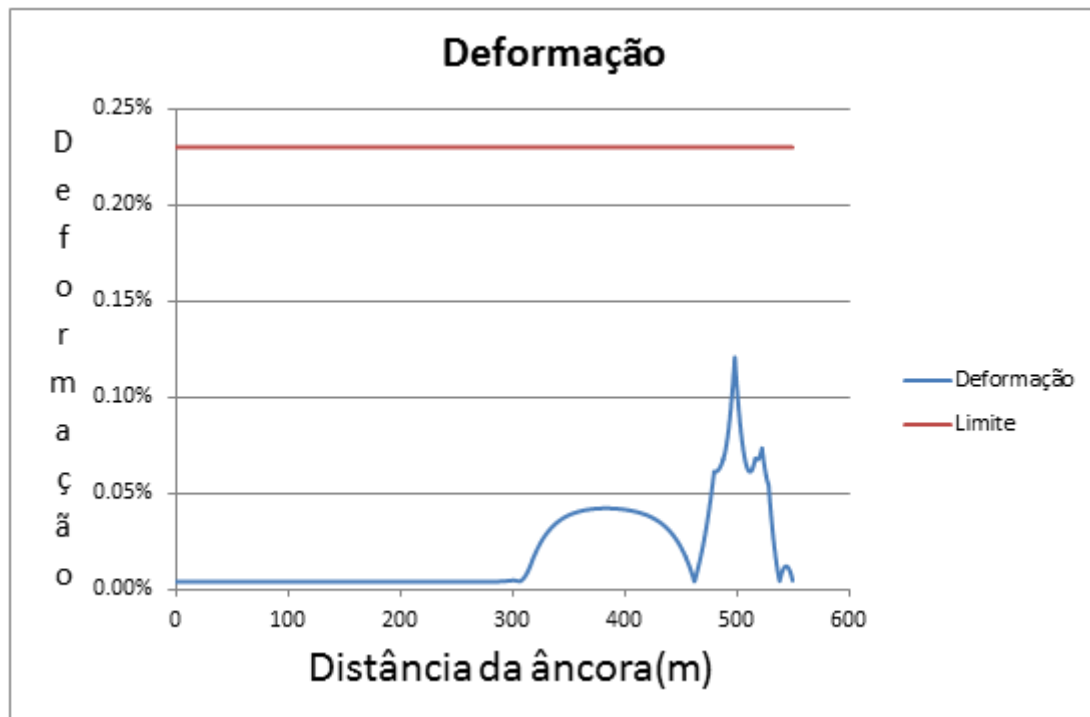


Gráfico 14 – Deformação para raio de curvatura 280m e profundidade 25m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa(249804KPa), sendo que seu valor difere consideravelmente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção.

8.2.2 Conclusões para análise de profundidade de 25m

A partir dos gráficos de tensão para diferentes raios de curvatura foi possível plotar um gráfico da tensão máxima para cada raio de curvatura rampa-stinger:

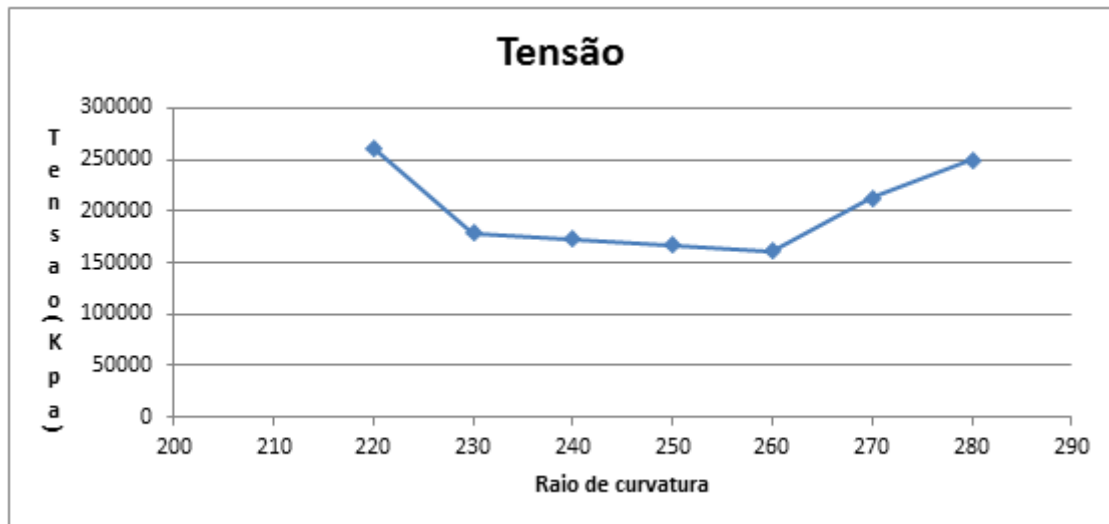


Gráfico 15 – Tensão X Raio de curvatura para profundidade de 25m

A partir do gráfico 15 pode-se concluir que o raio de curvatura rampa-stinger para a profundidade de 25m é 260m, pois a tensão é menor em relação aos outros valores de tensão.

8.2.3 Análise de Tensões para profundidade de 35m

Para a profundidade de 35m foi verificada a tensão de Von-Misses e deformações para a configuração estática para os seguintes raios da rampa-stinger: 180m, 190m, 200m, 210m, 220m, 230m, 240m, 250m e 260m.

Vale lembrar que o critério de lançamento simplificado é aqui utilizado, onde os níveis de tensão não deveriam ultrapassar $0.87 f_y$ (360.18Mpa) e os níveis de deformação não deveriam ultrapassar 0.23% na análise estática e 0.29% na análise dinâmica para o aço X60. Os resultados se encontram logo abaixo:

8.2.3.1 Rampa 180m (análise estática)

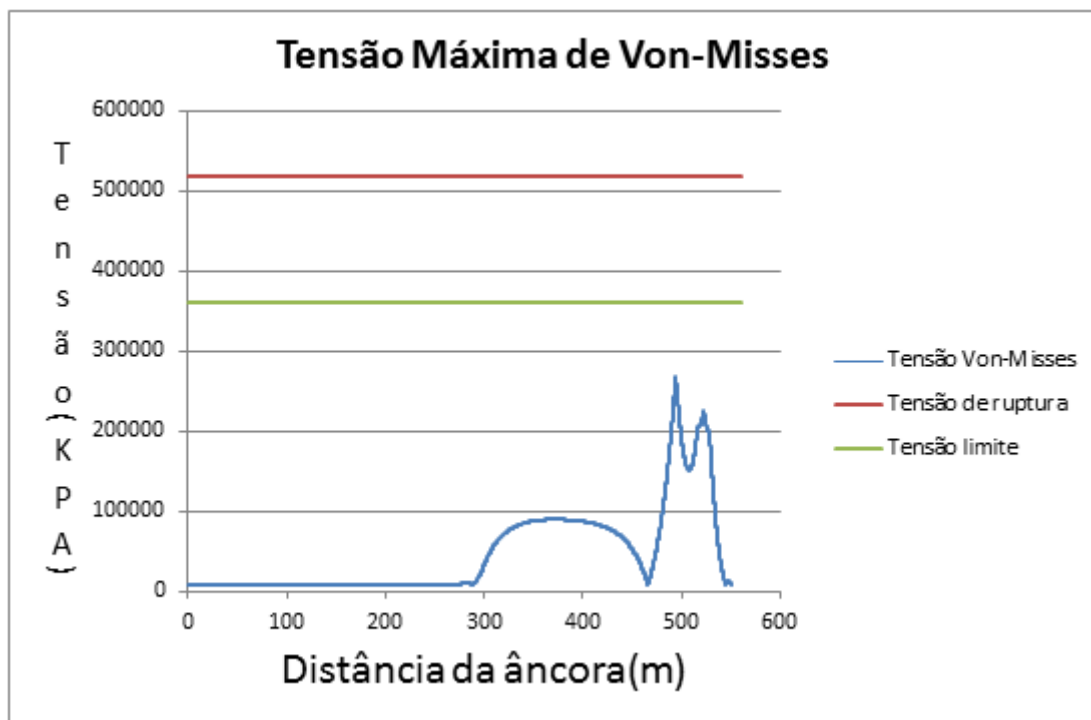


Gráfico 16 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 180m e profundidade 35m

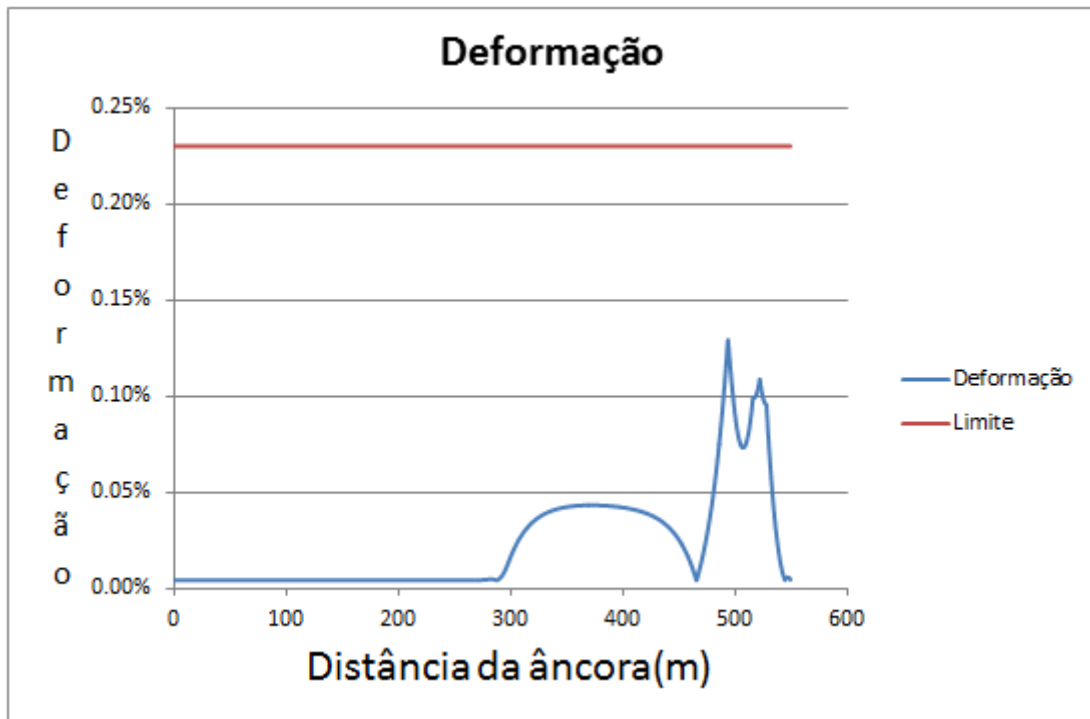


Gráfico 17 - Deformação para raio de curvatura 180m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa(267581.8KPa), porém existe outro pico de tensão próximo dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção.

8.2.3.2 Rampa 190m(análise estática)

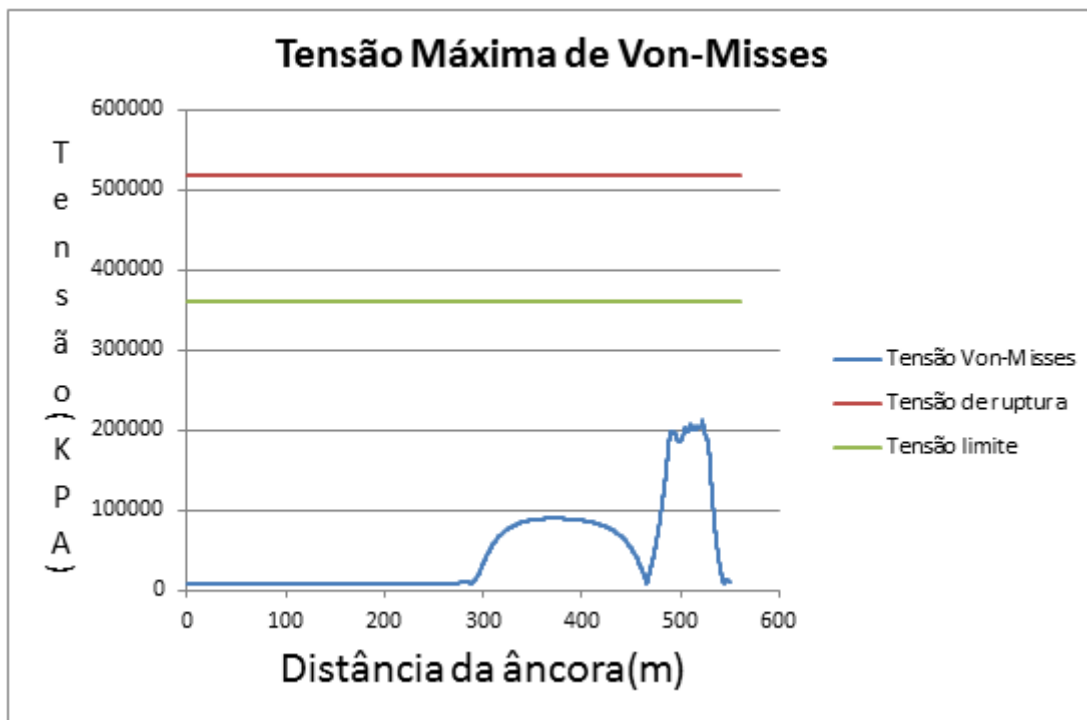


Gráfico 18 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 190m e profundidade 35m

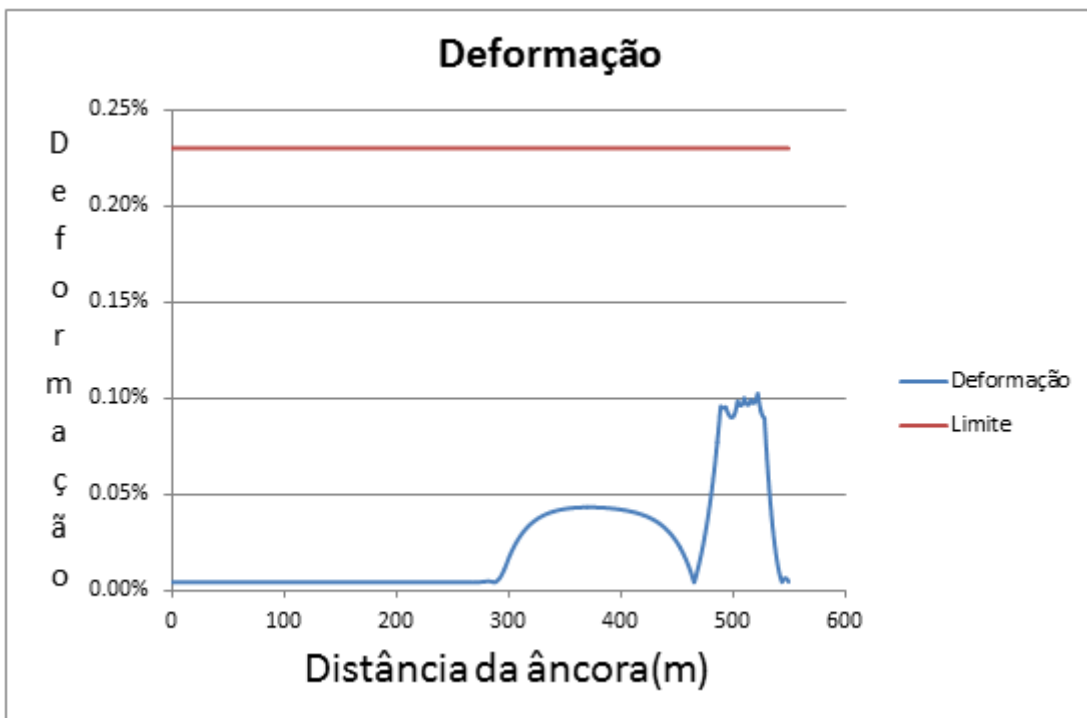


Gráfico 19 - Deformação para raio de curvatura 190m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (212116KPa), porém seu valor não

difere tanto dos outros que estão perto dele Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção.

8.2.3.3 Rampa 200m(análise estática)

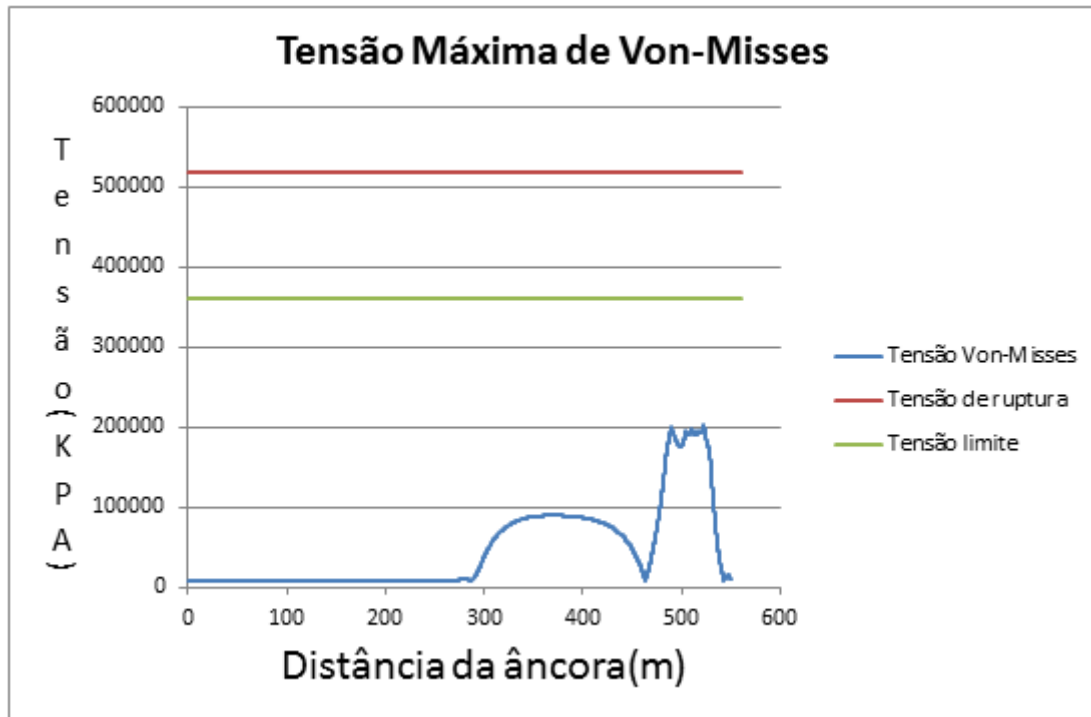


Gráfico 20 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 200m e profundidade 35m

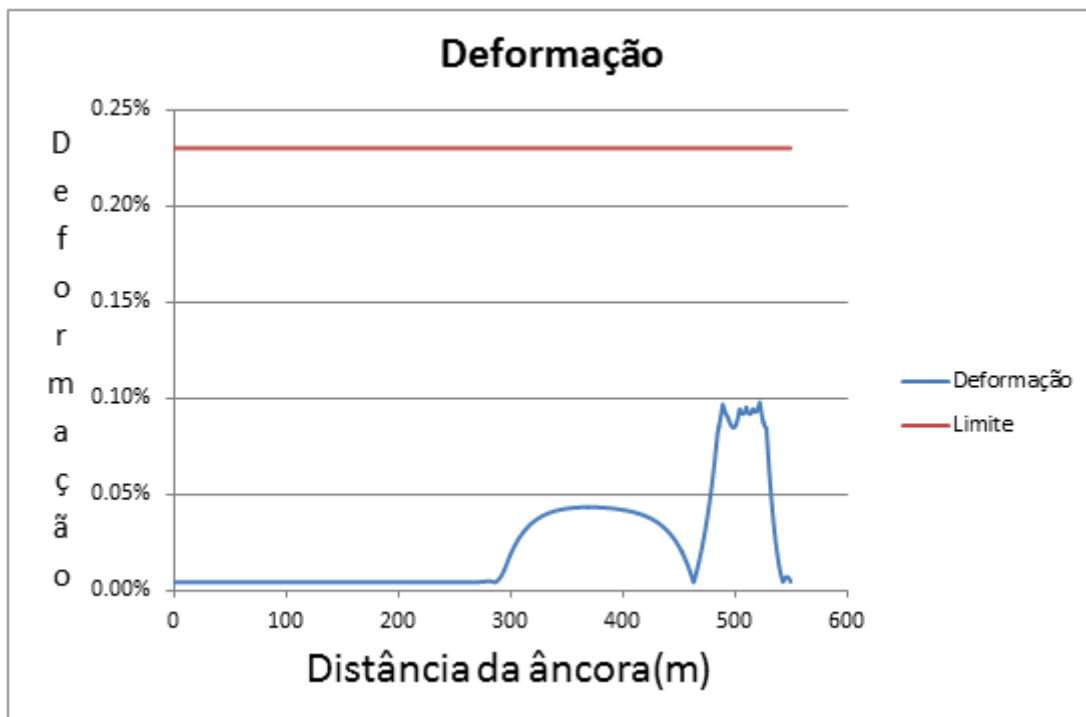


Gráfico 21 - Deformação para raio de curvatura 200m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (202636.7KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta uma ligeira diminuição da tensão de Von-Mises.

8.2.3.4 Rampa 210m(análise estática)

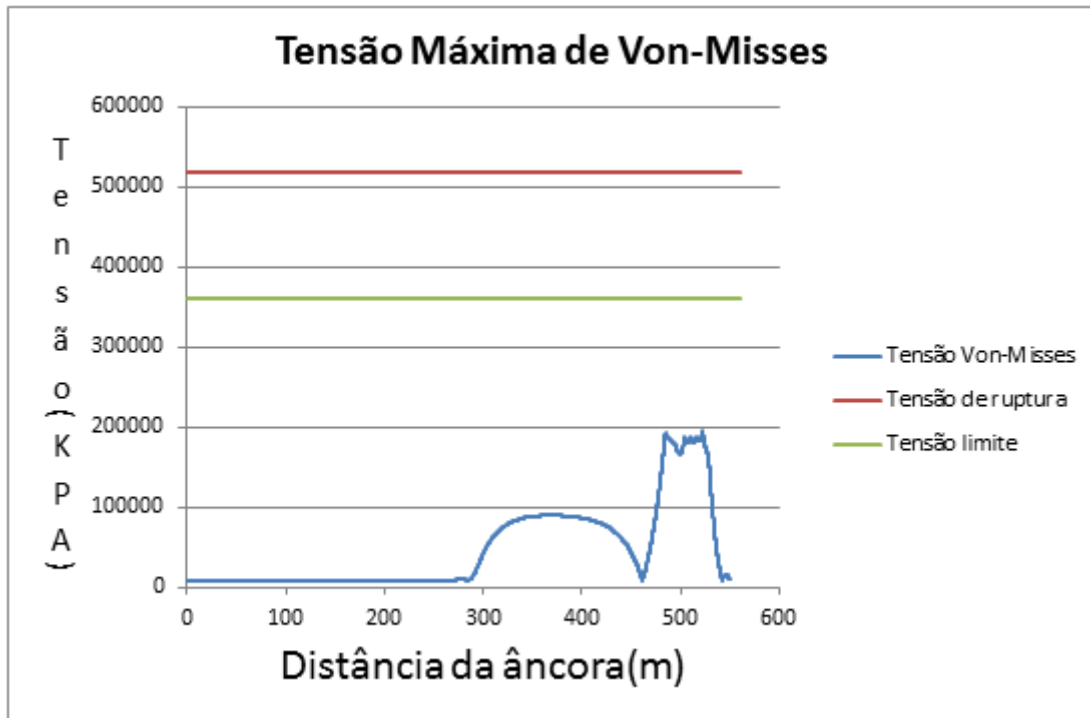


Gráfico 22 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 210m e profundidade 35m

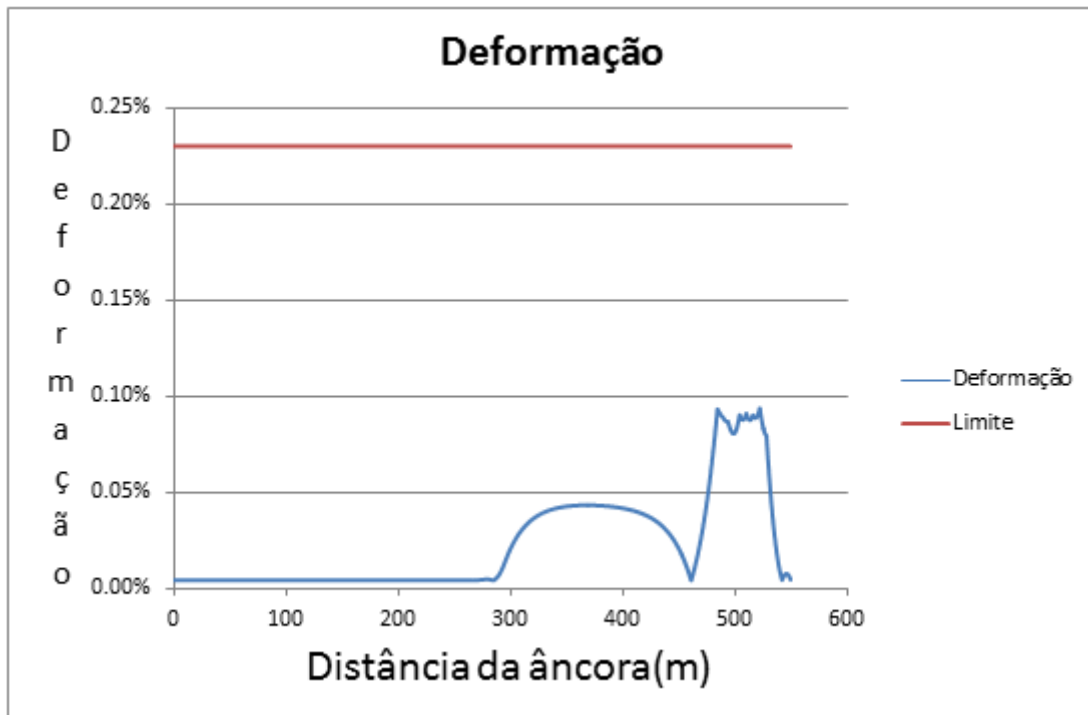


Gráfico 23 - Deformação para raio de curvatura 210m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (194095.7KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresente uma ligeira diminuição da tensão de Von-Misses.

8.2.3.5 Rampa 220m(análise estática)

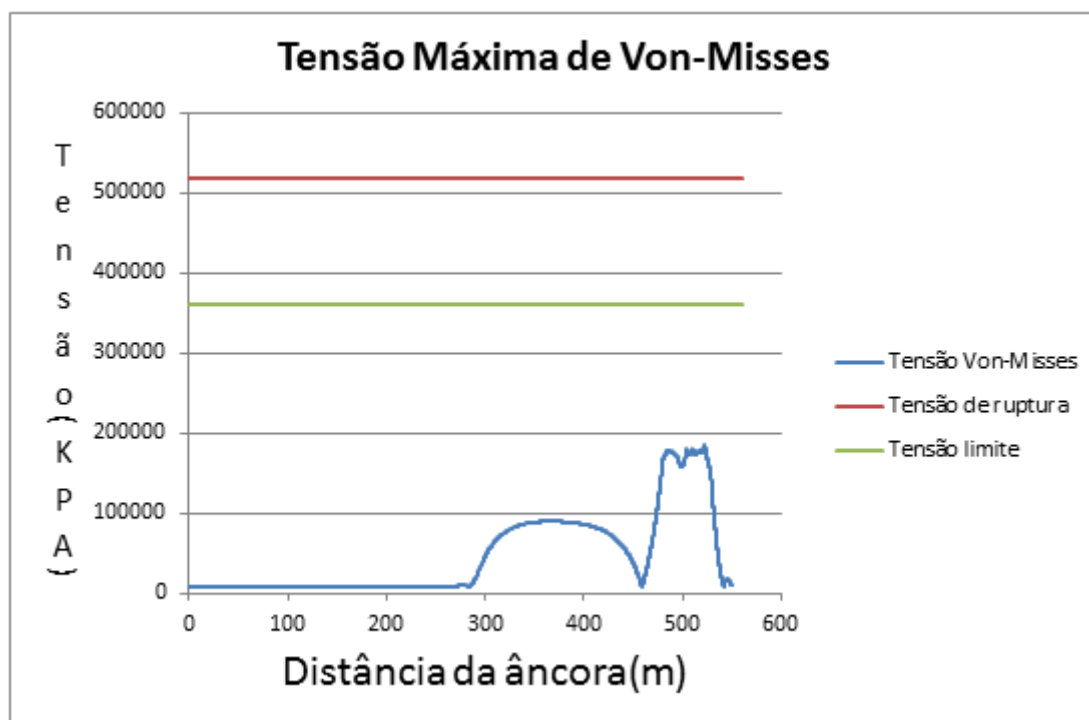


Gráfico 24 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 220m e profundidade 35m

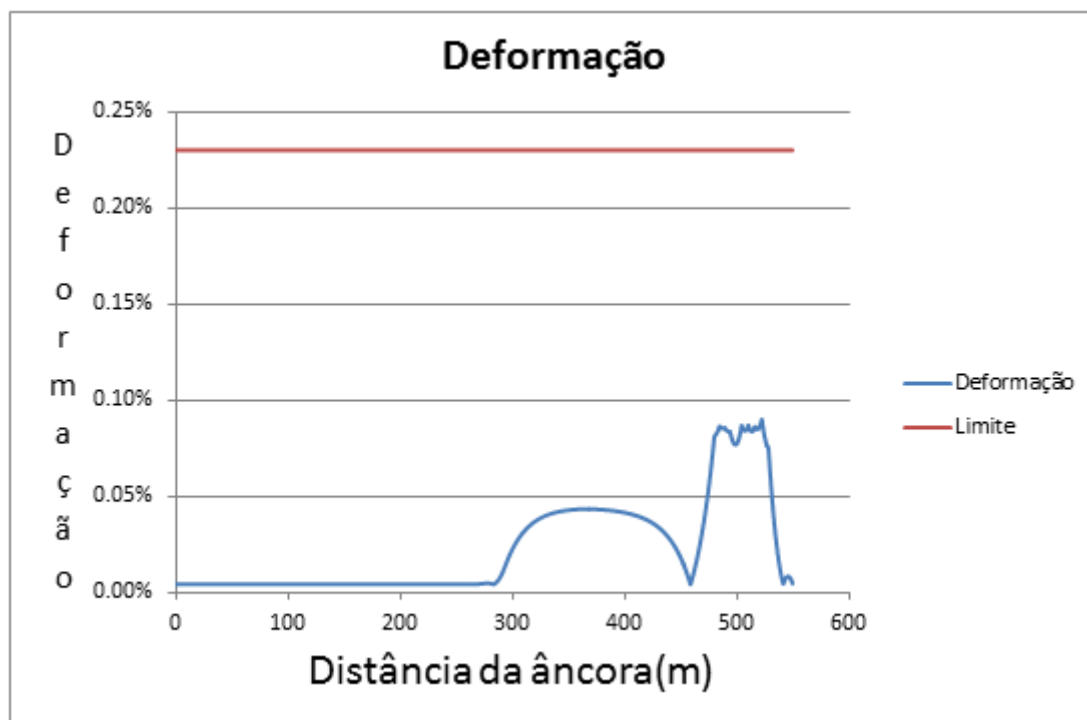


Gráfico 25 - Deformação para raio de curvatura 220m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (186144.7KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta uma ligeira diminuição da tensão de Von-Misses.

8.2.3.6 Rampa 230m(análise estática)

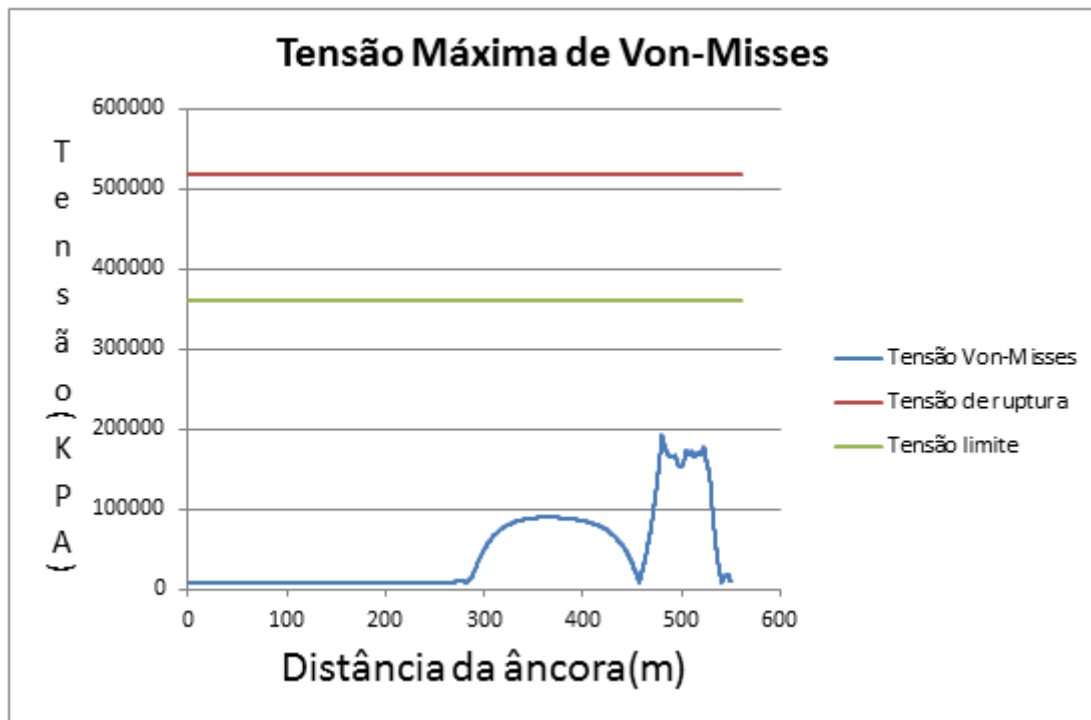


Gráfico 26 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 230m e profundidade 35m

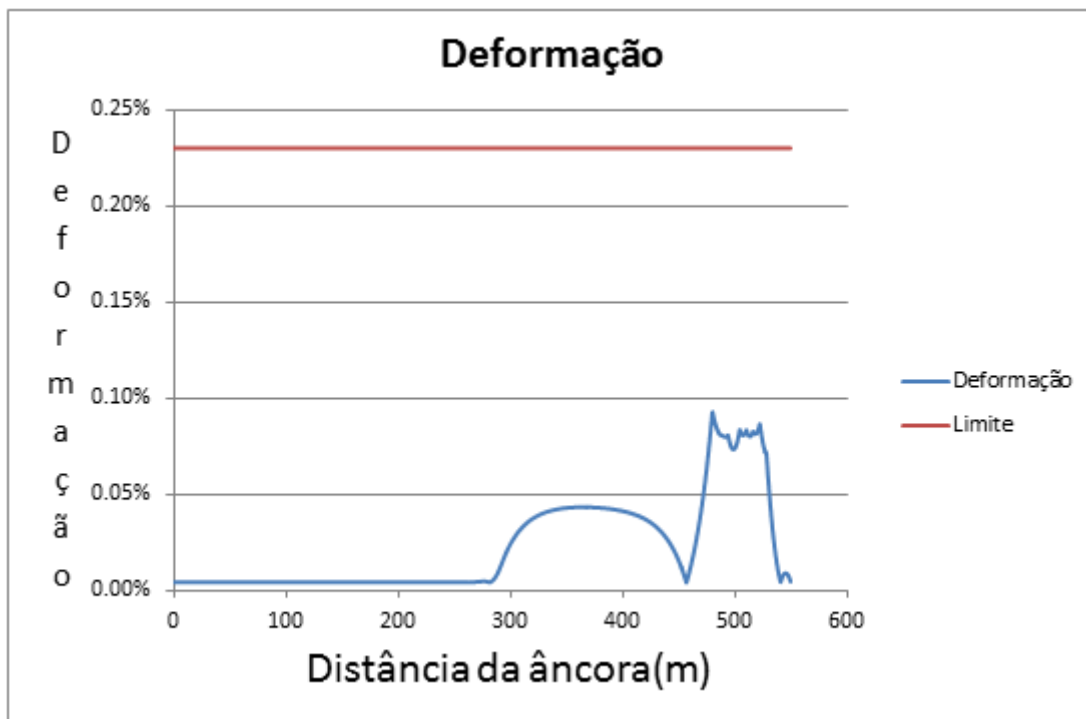


Gráfico 27 - Deformação para raio de curvatura 230m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (192069.4KPa), seu valor é ligeiramente diferente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta um ligeiro aumento da tensão de Von-Misses.

8.2.3.7 Rampa 240m(análise estática)

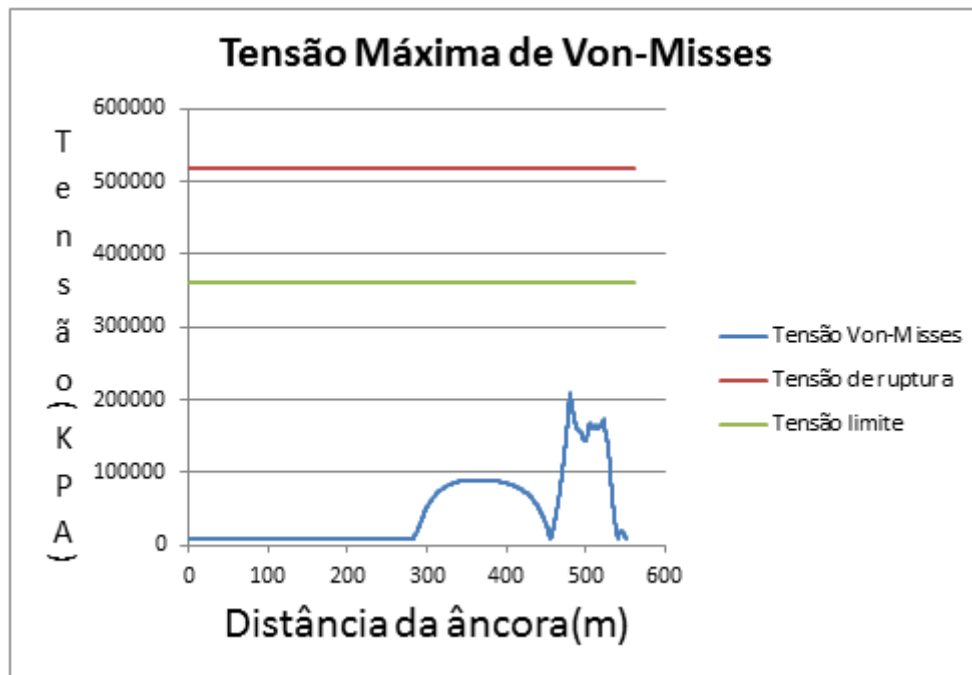


Gráfico 28 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 240m e profundidade 35m

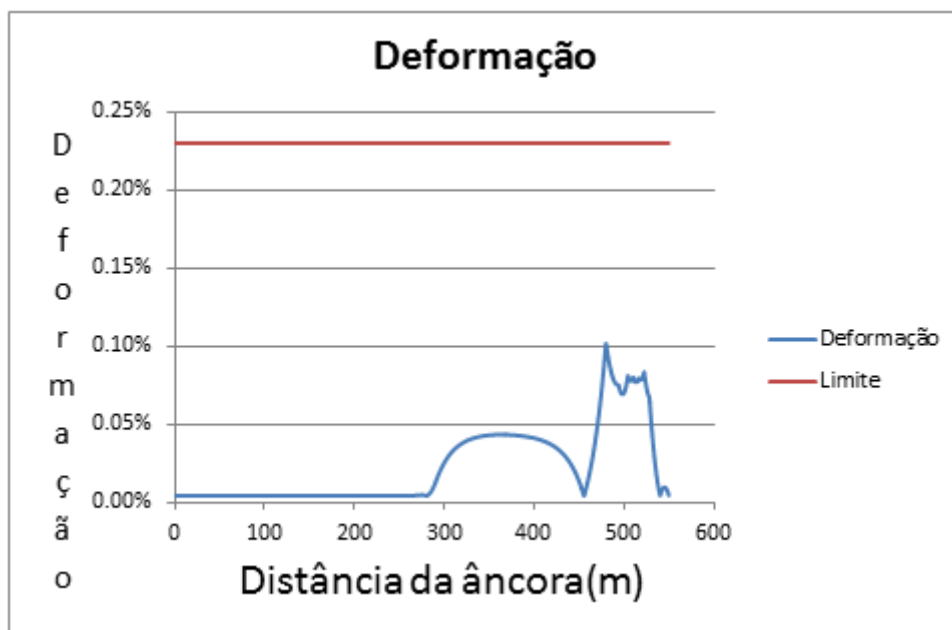


Gráfico 29 - Deformação para raio de curvatura 230m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (210430.5KPa), seu valor é ligeiramente diferente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda

de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresente um ligeiro aumento da tensão de Von-Misses.

8.2.3.8 Rampa 250m(análise estática)

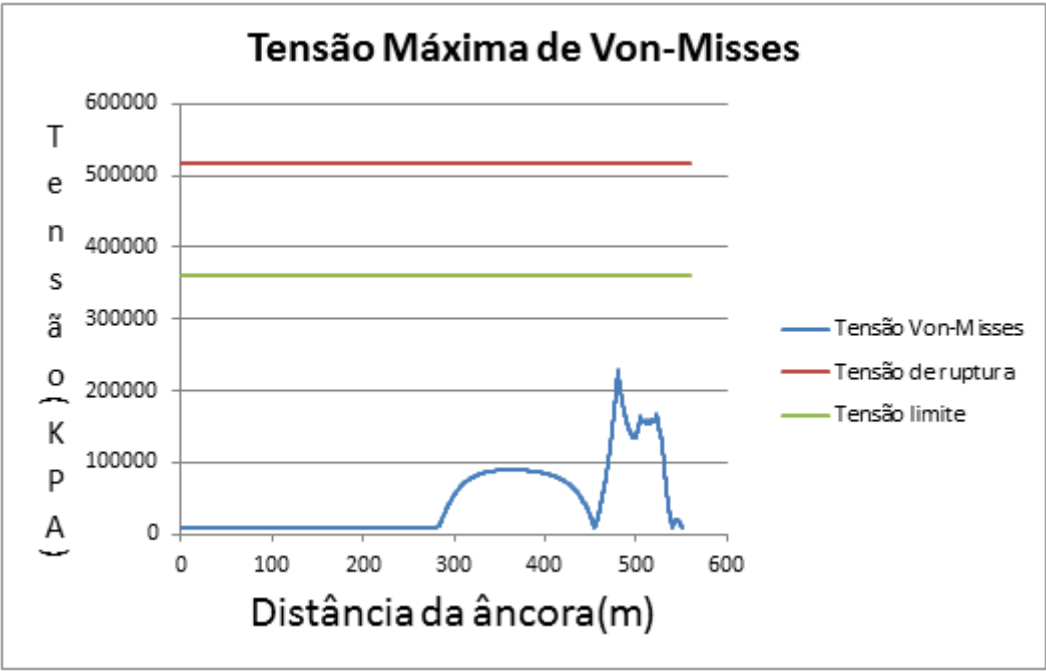


Gráfico 30 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 250m e profundidade 35m

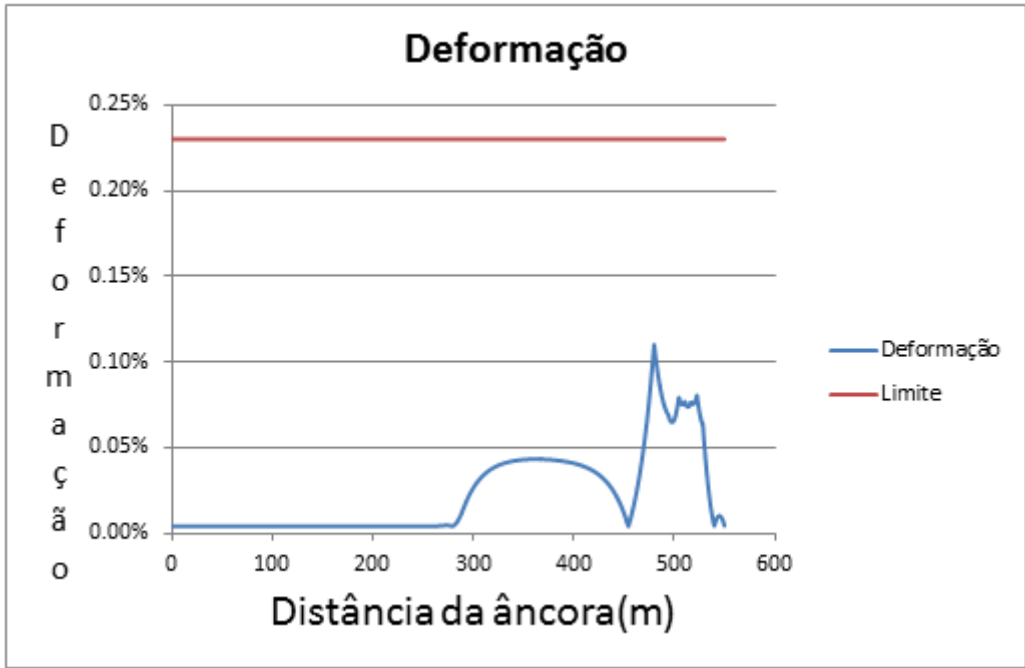


Gráfico 31 - Deformação para raio de curvatura 250m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (227830.1KPa), seu valor é diferente dos outros que estão perto dele Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresente um aumento da tensão de Von-Misses.

8.2.3.9 Rampa 260m(análise estática)

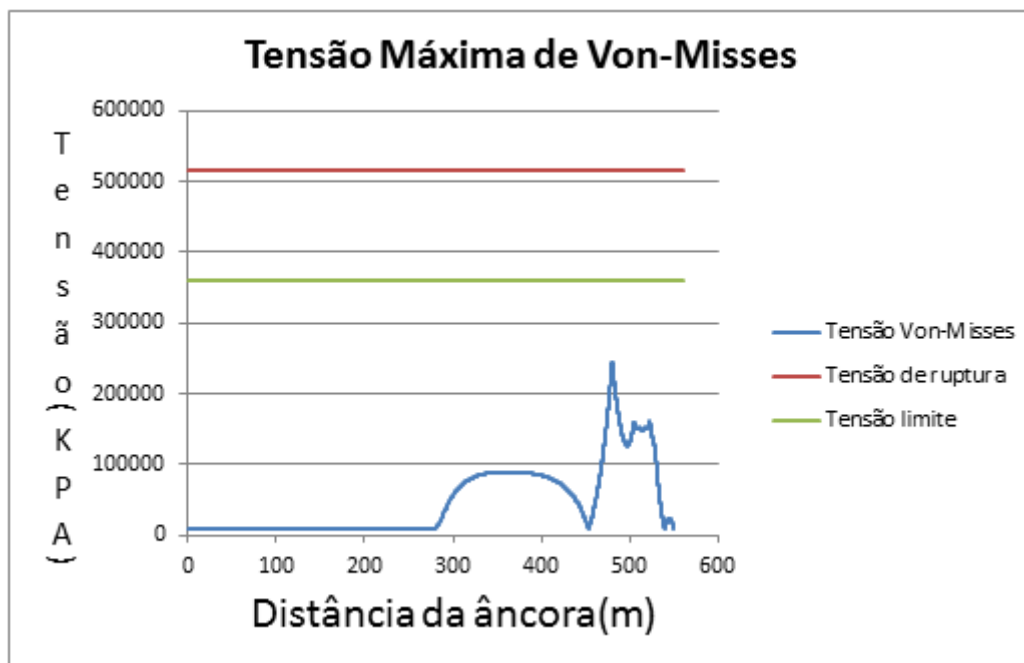


Gráfico 32 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 260m e profundidade 35m

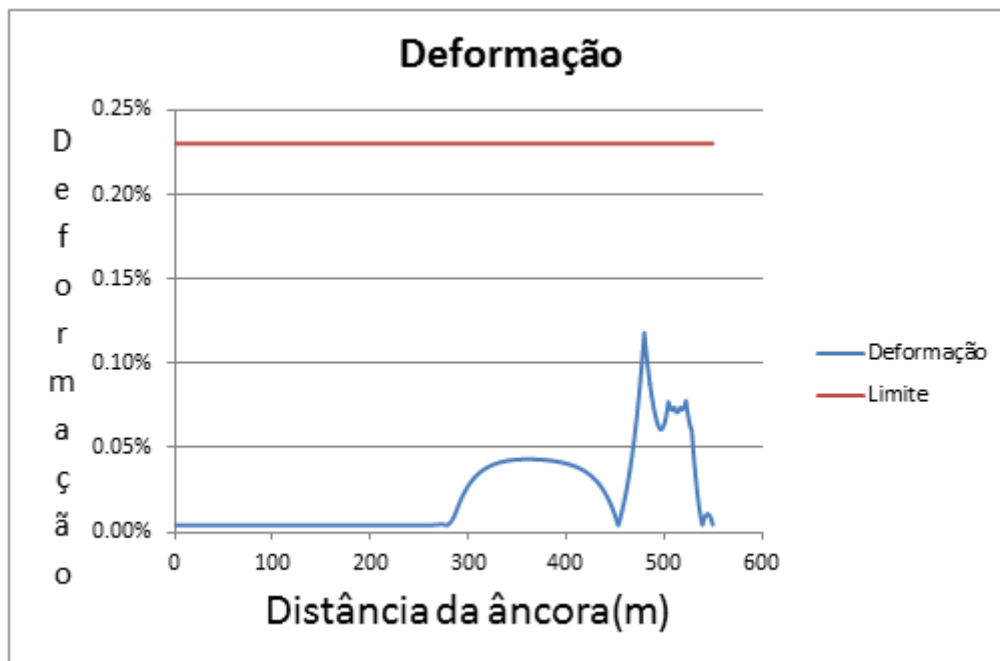


Gráfico 33 - Deformação para raio de curvatura 260m e profundidade 35m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (244589KPa), seu valor é diferente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta um aumento da tensão de Von-Misses.

8.2.4 Conclusões para análise de profundidade de 35m

A partir dos gráficos de tensão para diferentes raios de curvatura foi possível plotar um gráfico da tensão máxima para cada raio de curvatura rampa-stinger:

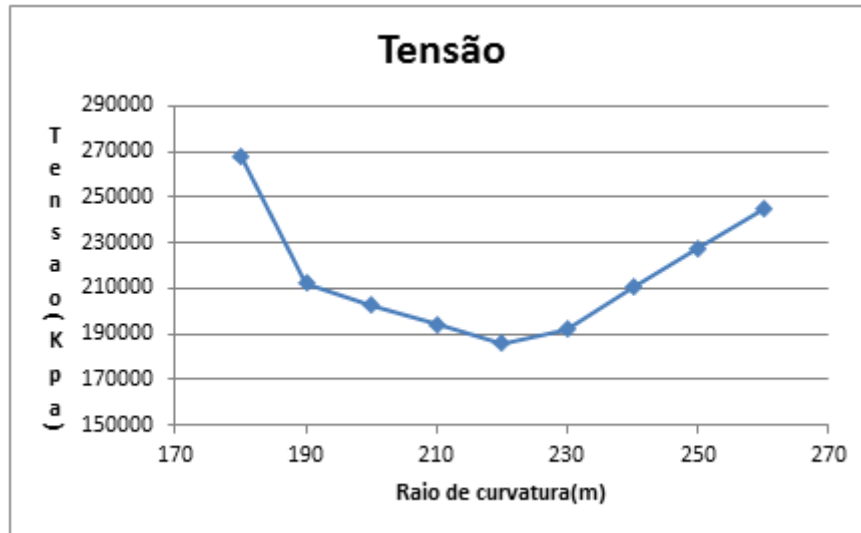


Gráfico 34 - Tensão X Raio de curvatura para profundidade de 35m

A partir do gráfico 34 pode-se concluir que o raio de curvatura rampa-stinger ideal para a profundidade de 35m é 220m, pois a tensão é menor em relação aos outros valores de tensão(186144.7KPa). É importante observar que entre o ponto máximo de tensão (267581.8KPa , raio de curvatura 180m) e o entre o ponto mínimo existe uma variação de 30% nas tensões, isso ressalta a importância da escolha do raio de curvatura ideal.

8.2.5 Análise de Tensões para profundidade de 45m

Para a profundidade de 35m foi verificada a tensão de Von-Misses e deformações para a configuração estática para os seguintes raios da rampa-stinger: 160m, 170m, 180m, 190m, 200m, 210m, 220m e 230m.

Vale lembrar que o critério de lançamento simplificado é aqui utilizado, onde os níveis de tensão não deveriam ultrapassar $0.87 f_y$ (360.18Mpa) e os níveis de deformação não deveriam ultrapassar 0.23% na análise estática e 0.29% na análise dinâmica para o aço X60. Os resultados se encontram logo abaixo:

8.2.5.1 Rampa 160m(análise estática)

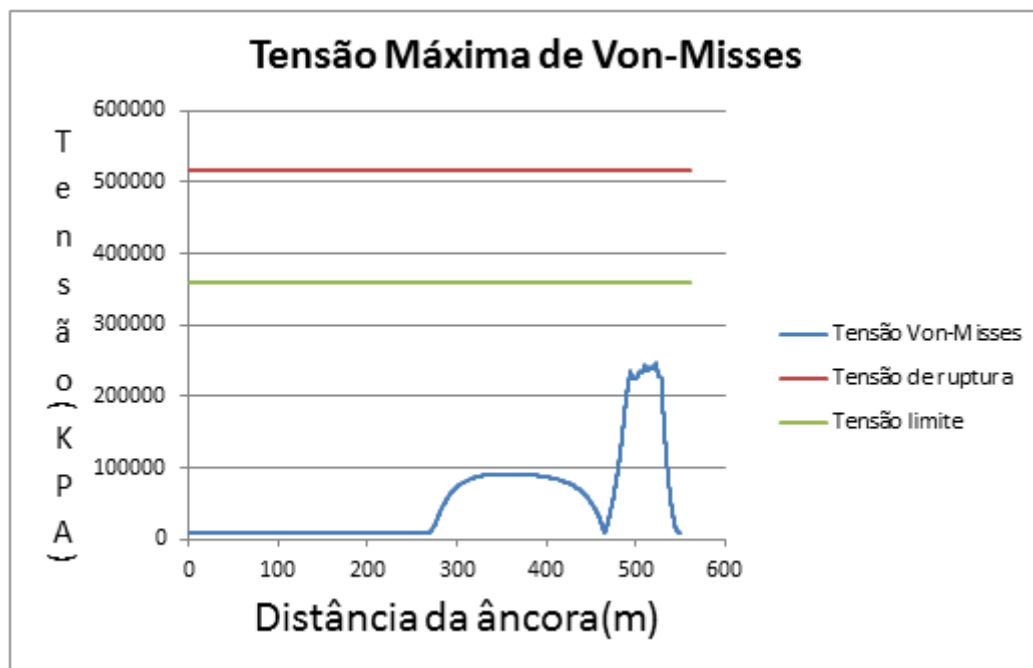


Gráfico 35 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 160m e profundidade 45m

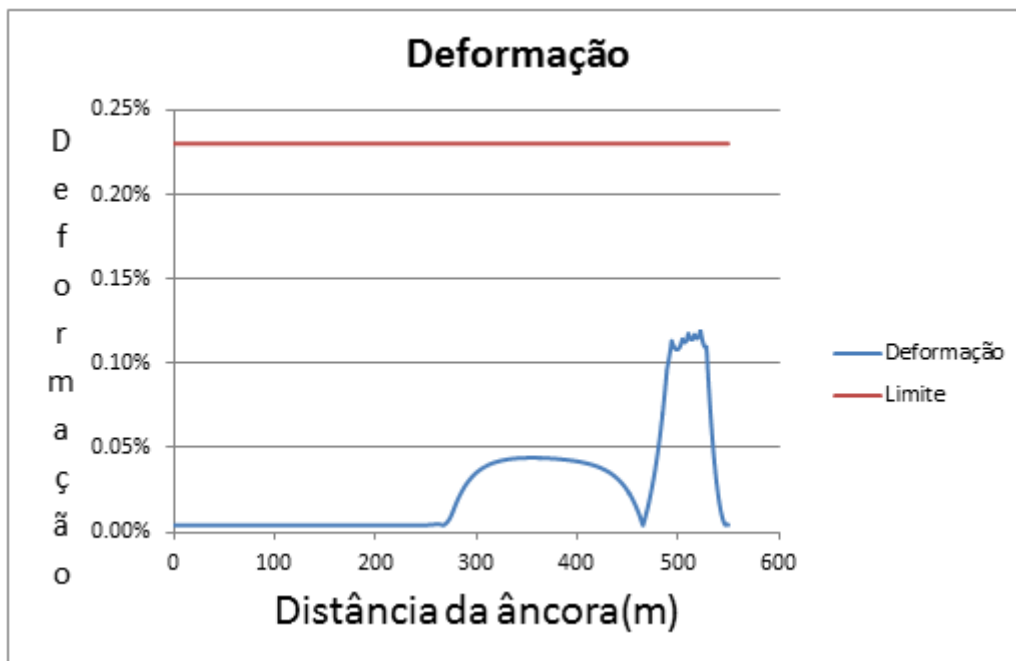


Gráfico 36 - Deformação para raio de curvatura 160m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (247518.4KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Pode-se perceber que as tensões não alcançam o patamar limite do critério simplificado.

8.2.5.2 Rampa 170m(análise estática)

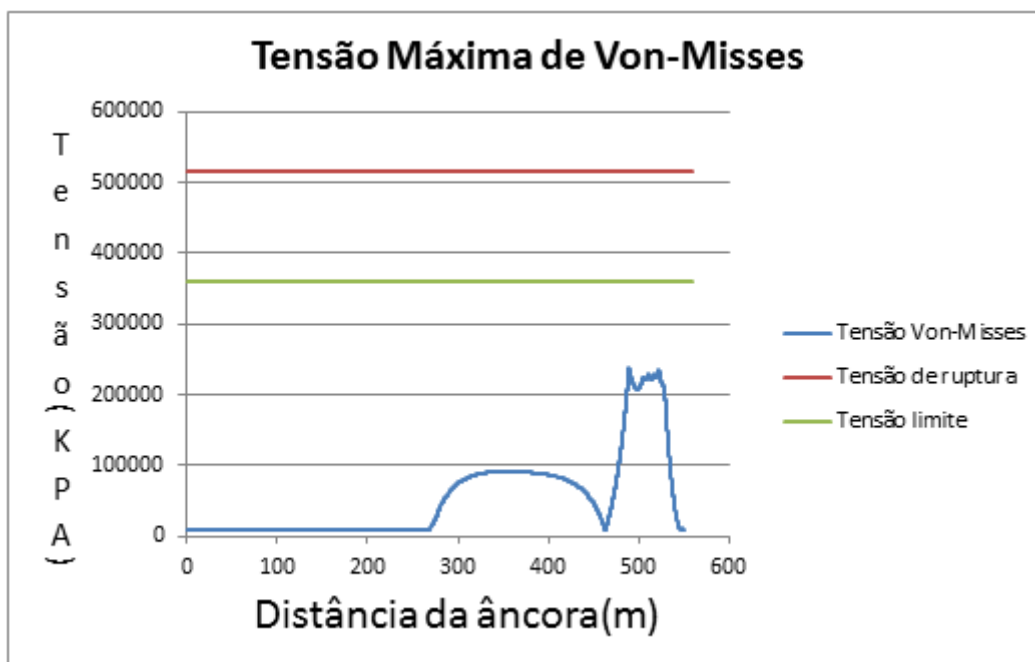


Gráfico 37 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 170m e profundidade 45m

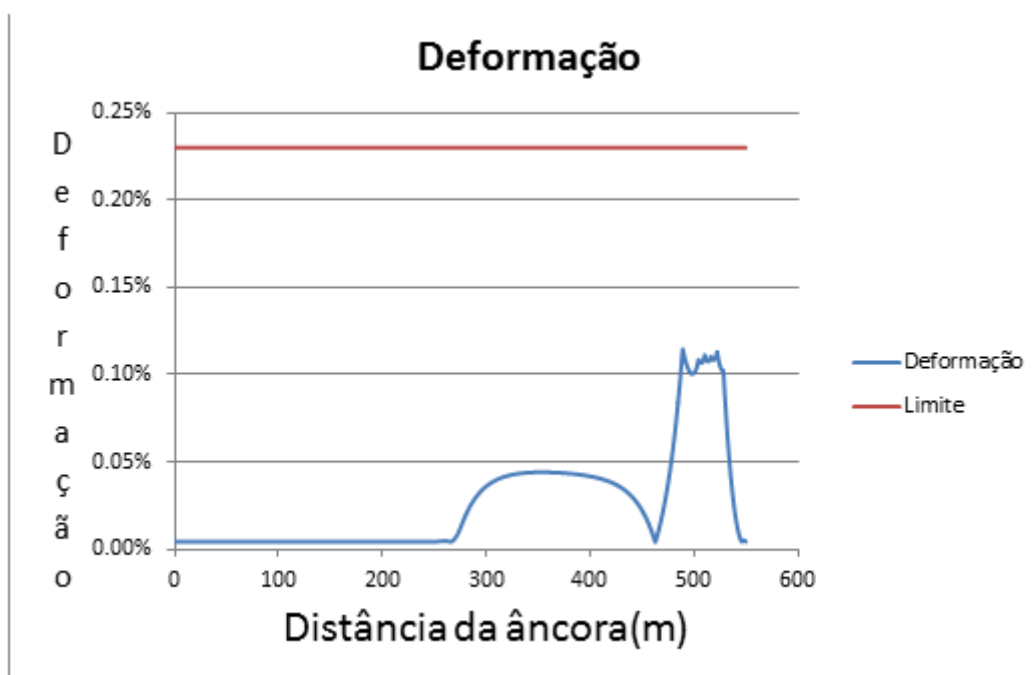


Gráfico 38- Deformação para raio de curvatura 170m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (237349.5 KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar

semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresente uma ligeira diminuição da tensão de Von-Misses.

8.2.5.3 Rampa 180m(análise estática)

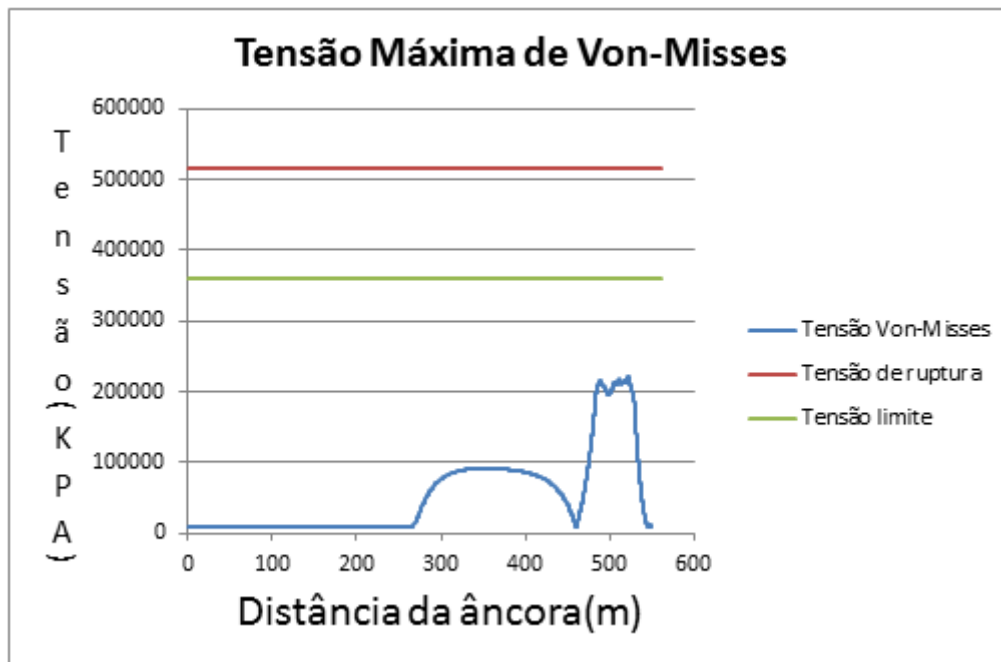


Gráfico 39 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 180m e profundidade 45m

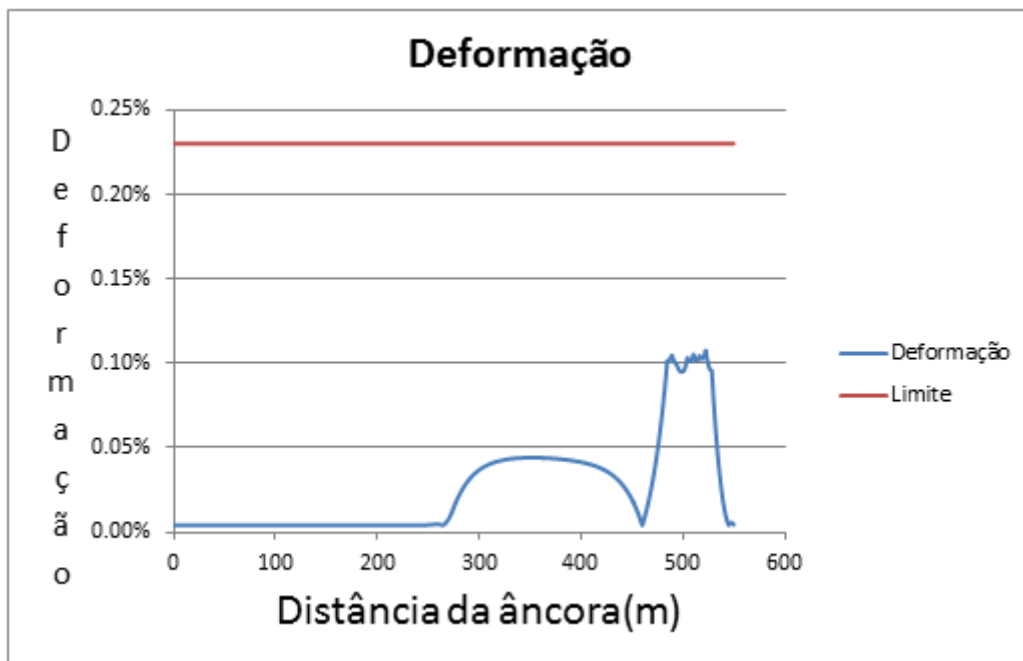


Gráfico 40 - Deformação para raio de curvatura 180m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (222509 KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta uma ligeira diminuição da tensão de Von-Mises.

8.2.5.4 Rampa 190m(análise estática)

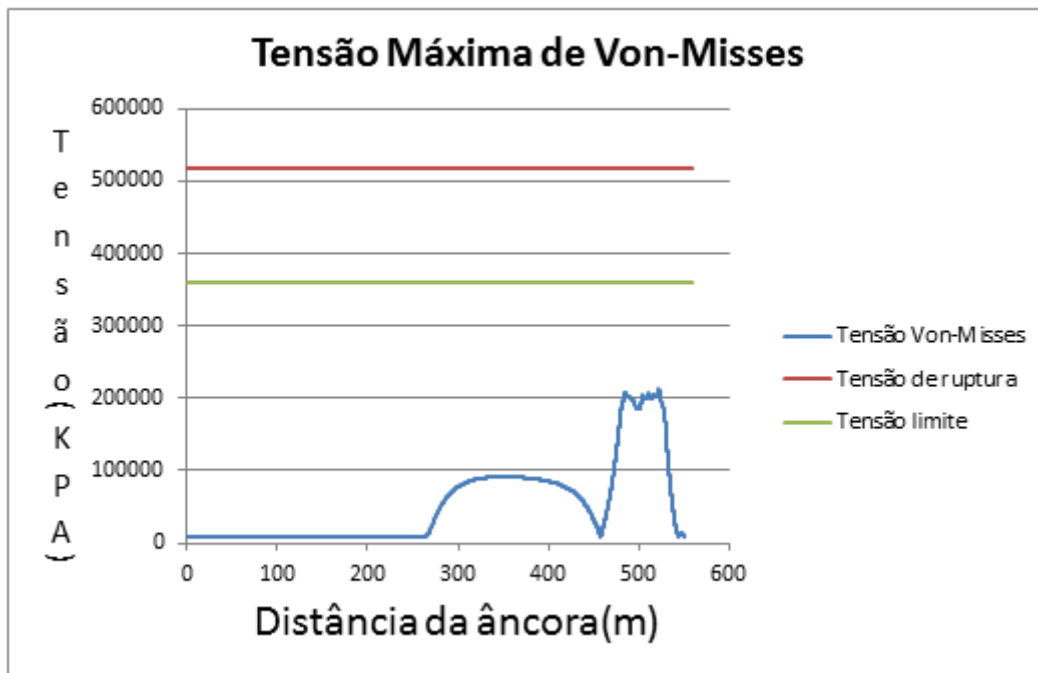


Gráfico 41 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 190m e profundidade 45m

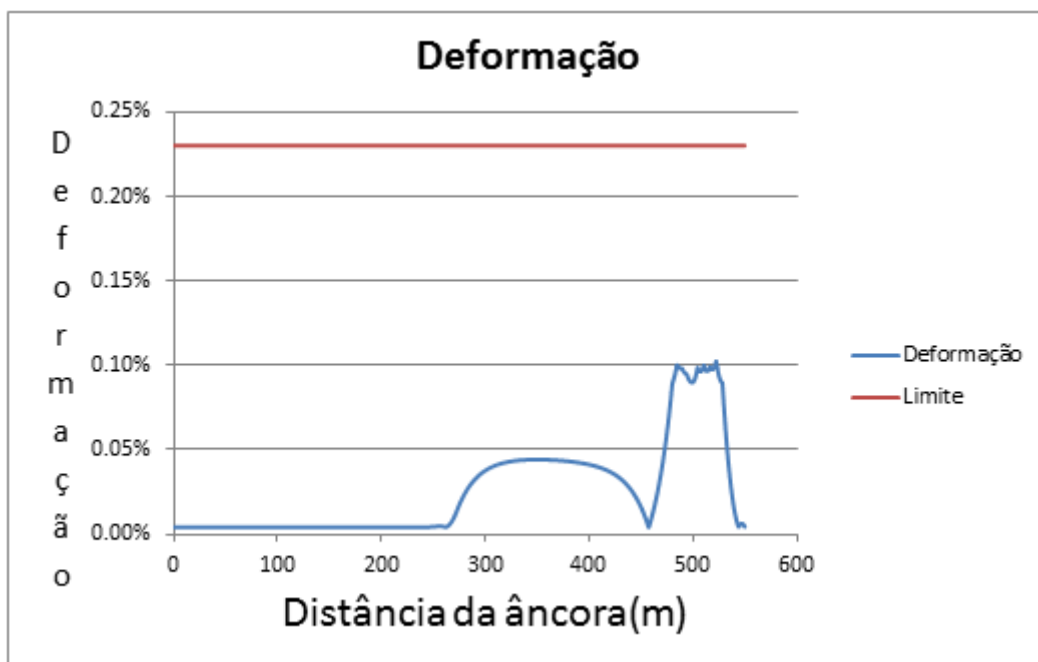


Gráfico 42 - Deformação para raio de curvatura 190m e profundidade 45m

Pode se perceber aqui também pelos gráficos que as tensões alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (212116.9 KPa), porém seu valor não difere tanto dos outros que estão perto dele. Depois desses valores, novamente com um patamar semelhante de deformação, pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a

curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresente uma ligeira diminuição da tensão de Von-Misses.

8.2.5.5 Rampa 200m(análise estática)

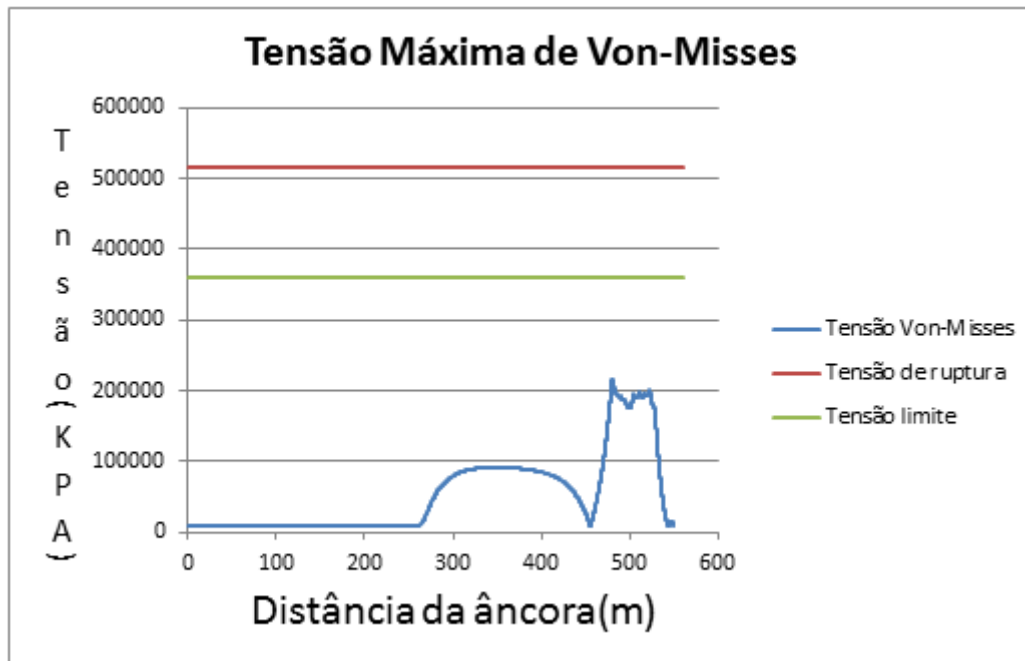


Gráfico 43 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 200m e profundidade 45m

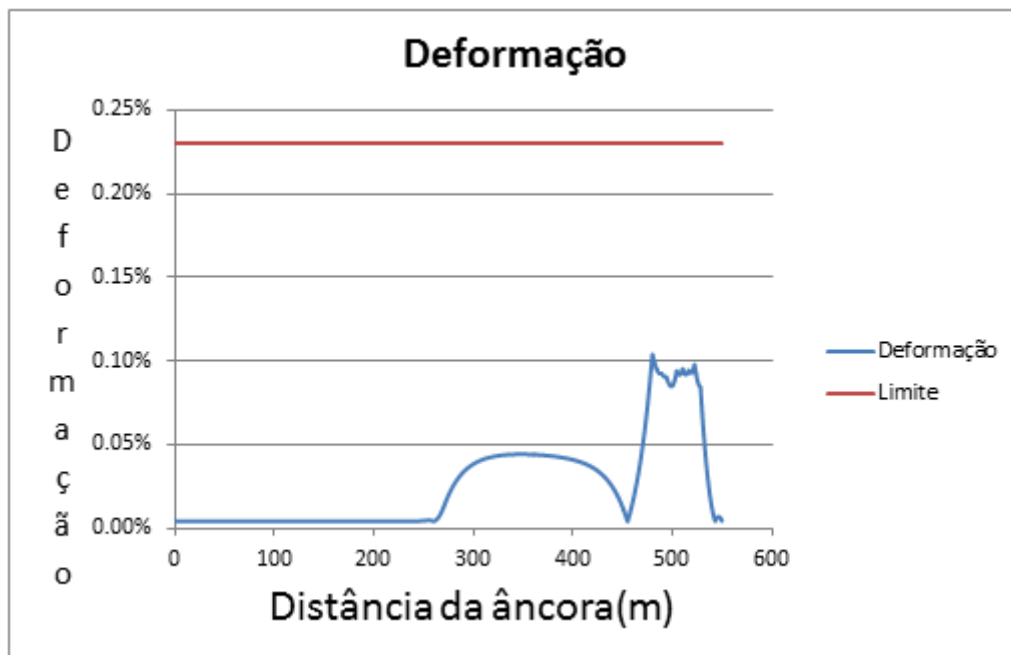


Gráfico 44 - Deformação para raio de curvatura 200m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (215119.9KPa), o seu valor difere um pouco dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta um ligeiro aumento da tensão de Von-Misses.

8.2.5.6 Rampa 210m(análise estática)

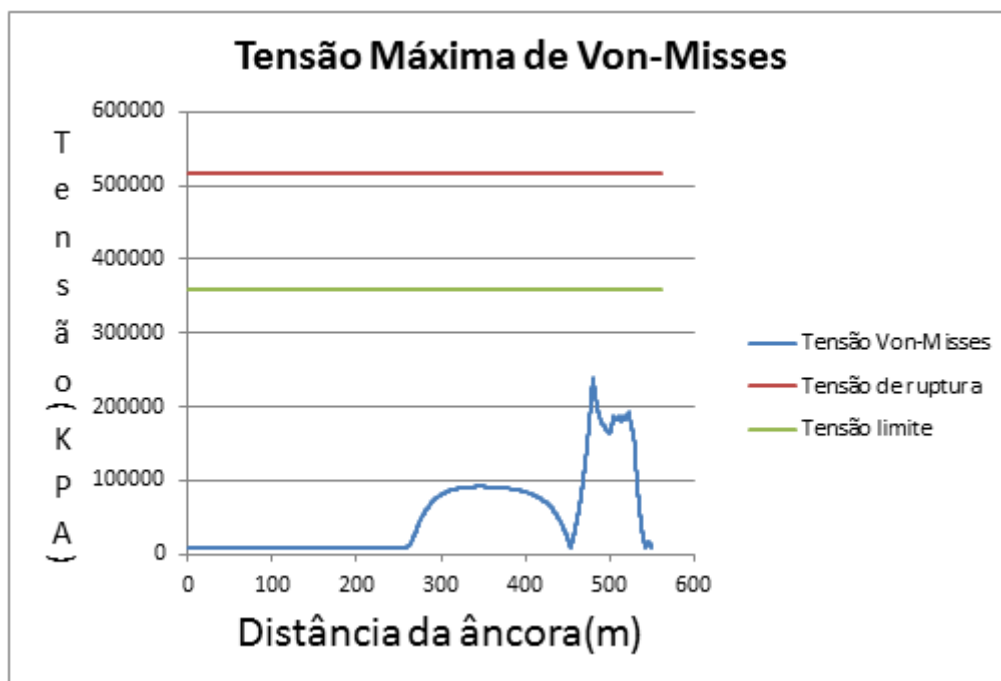


Gráfico 45 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 210m e profundidade 45m

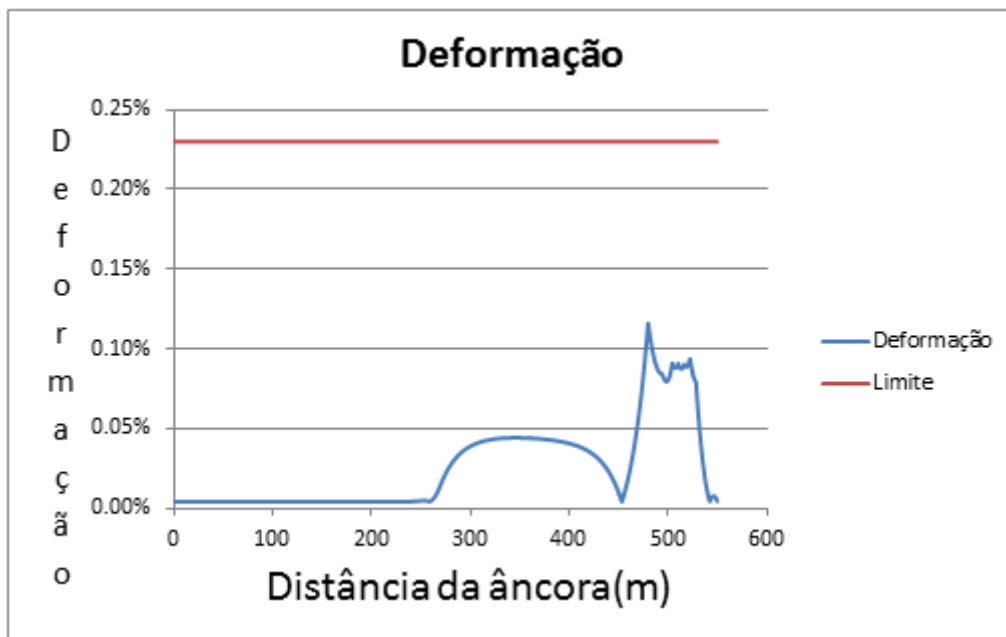


Gráfico 46 - Deformação para raio de curvatura 210m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (240186.3KPa), o seu valor difere consideravelmente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta um aumento da tensão de Von-Misses.

8.2.5.7 Rampa 220m(análise estática)

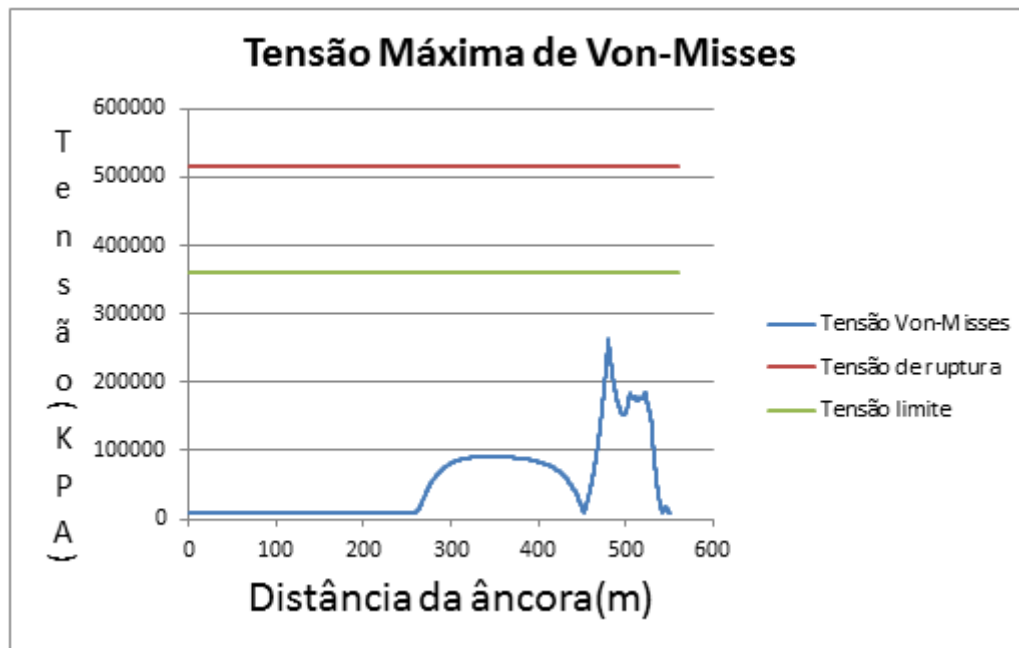


Gráfico 47 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 220m e profundidade 45m

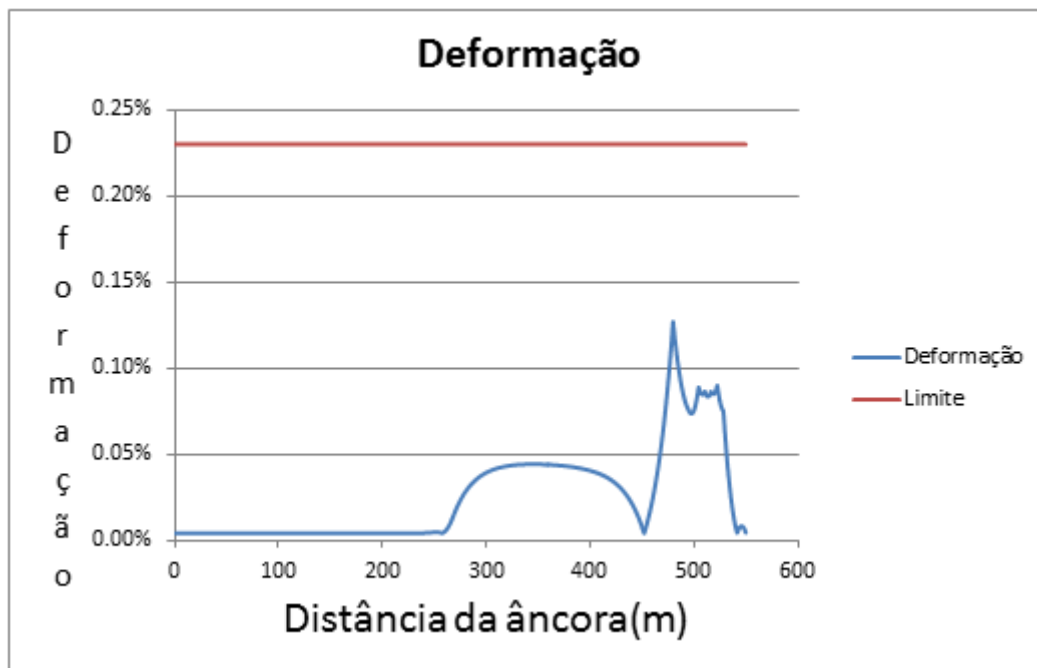


Gráfico 48 - Deformação para raio de curvatura 220m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (262667.6KPa), o seu valor difere

consideravelmente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresenta um aumento da tensão de Von-Misses, demonstrando que o aumento do raio de curvatura faz com que a Tensão aumente e se concentre em um único ponto do duto.

8.2.5.8 Rampa 230m(análise estática)

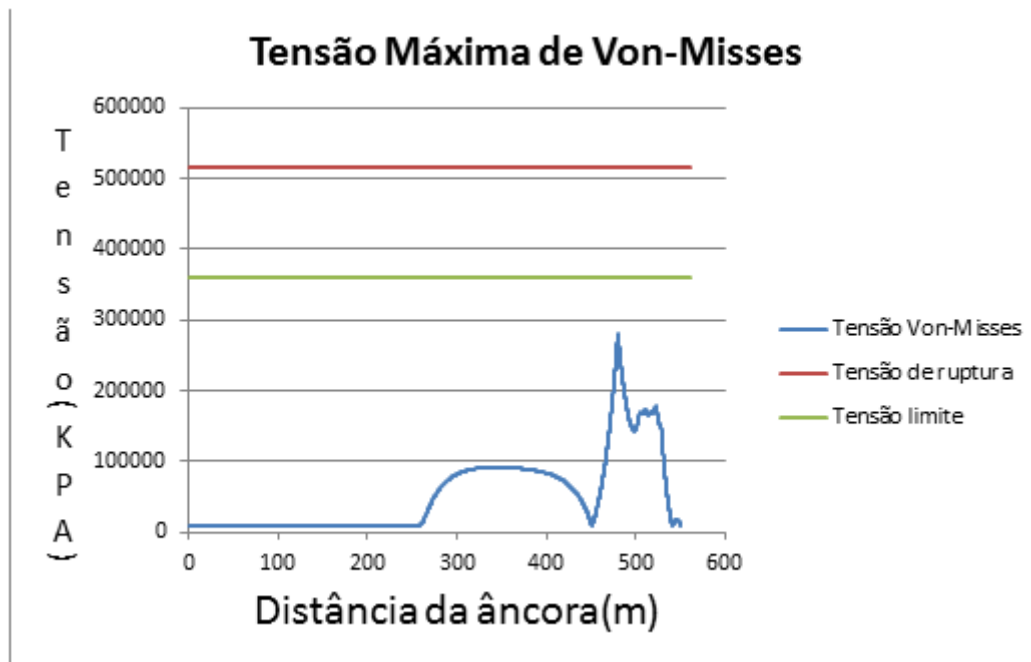


Gráfico 49 - Tensão de Von-Misses para raio de curvatura 230m e profundidade 45m

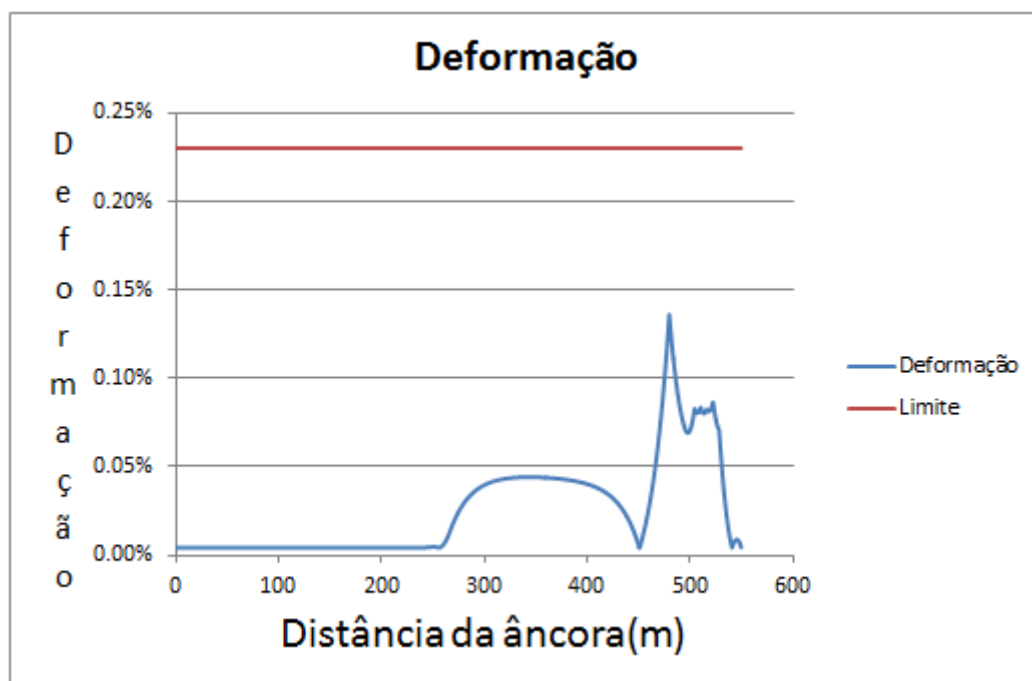


Gráfico 50 - Deformação para raio de curvatura 230m e profundidade 45m

Pode se perceber pelos gráficos que as tensões e deformações alcançam seu valor máximos em um ponto que está na rampa (281526.7KPa), o seu valor difere consideravelmente dos outros que estão perto dele. Depois desses valores com um patamar semelhante de deformação pode-se perceber que a tensão chega a um valor bem baixo e depois tende a subir novamente, esse ponto é o ponto de inflexão onde a

curvatura muda de direção. Em relação a rampa anterior essa rampa apresente um aumento da tensão de Von-Misses, demonstrando que o aumento do raio de curvatura faz com que a Tensão aumente e se concentre em um único ponto

8.2.6 Conclusões para análise de profundidade de 45m

A partir dos gráficos de tensão para diferentes raios de curvatura foi possível plotar um gráfico da tensão máxima para cada raio de curvatura rampa-stinger:

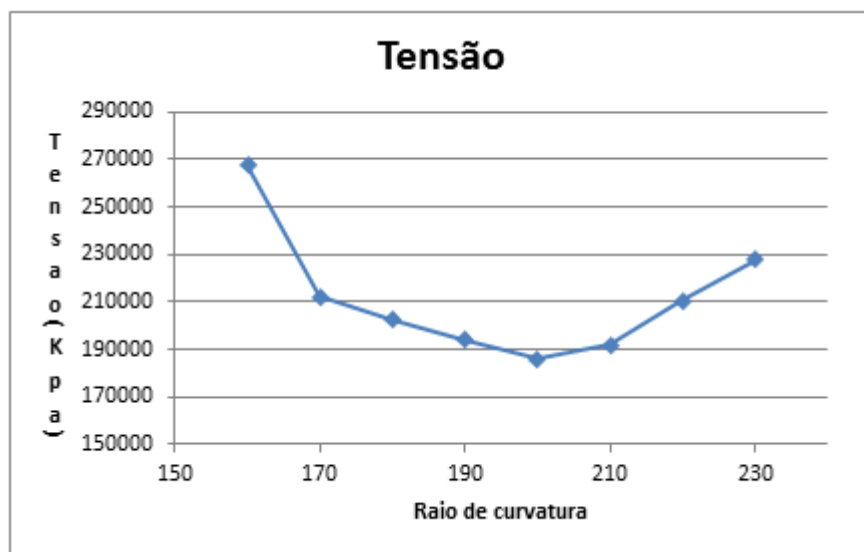


Gráfico 51 - Tensão X Raio de curvatura para profundidade de 45m

A partir do gráfico 51 pode-se concluir que o raio de curvatura rampa-stinger ideal para a profundidade de 45m é 200m, pois a tensão é menor em relação aos outros valores de tensão(215119.9KPa). É importante observar que entre o ponto máximo de tensão (247518.4KPa , raio de curvatura 160m) e o entre o ponto mínimo existe uma variação de 13% nas tensões, isso ressalta a importância da escolha do raio de curvatura ideal.

8.3 Conclusão para análises estáticas

A partir das análises anteriores pode-se construir um gráfico da profundidade pelo ângulo ideal da rampa e stinger com o intuito de se compreender a tendência do ângulo de curvatura com o aumento da profundidade.

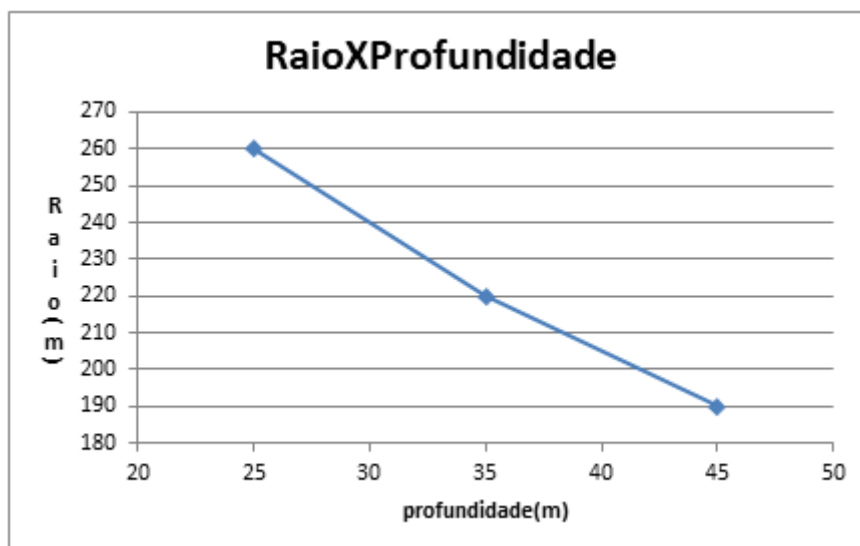


Gráfico 52 – Raio X Profundidade para análises estáticas

Pelo gráfico acima se conclui que o aumento da profundidade faz com que se tenha necessidade de diminuir o raio do conjunto rampa e stinger. Não foi viável aumentar mais a profundidade pois o raio se tornaria muito pequeno.

8.4 Análises Dinâmicas

A partir da escolha dos modelos com menores tensões para a configuração estática é possível fazer uma análise dinâmica para uma verificação mais profunda do comportamento destes modelos quando cargas ambientais estão atuando sobre eles. A seguir serão feitas essas análises dinâmicas desacopladas com as seguintes condições ambientais: onda com altura significativa de 2.5m e período de 5s, 6.5s, 8s e com correnteza de 1m/s de velocidade. Esses carregamentos atuam de frente com a embarcação. Não foi feito análises dinâmicas em outras direções pelo seu elevado tempo de análise. Nestas análises foi usado um intervalo de integração de 0.01segundos e um tempo total de análise de 1000segundos.

8.4.1 Profundidade de 25m e período 5s

Para a profundidade de 25m o raio de curvatura que obteve as menores tensões foi o de 260m. O período de onda para essa análise foi de 5 segundos. Neste modelo foi feito a análise dinâmica aplicando as condições ambientais ditas anteriormente. Vale lembrar que o critério de lançamento simplificado é aqui utilizado, onde os níveis de tensão não deveriam ultrapassar $0.87 f_y$ (360.18Mpa) e os níveis de deformação não deveriam ultrapassar 0.29% na análise dinâmica para o aço X60. Os resultados se encontram logo abaixo:

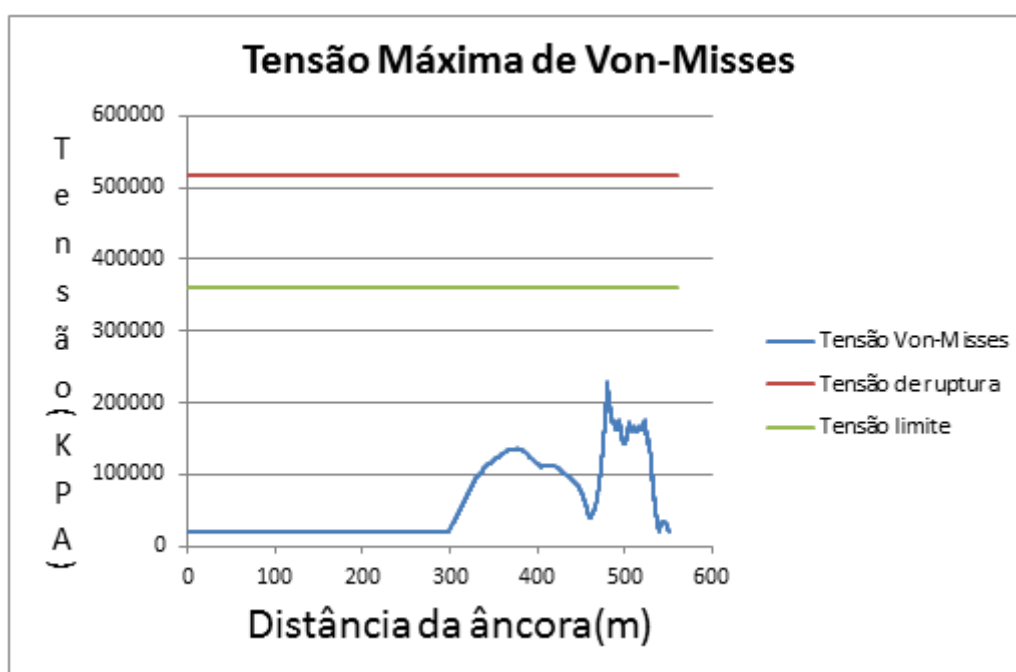


Gráfico 53 – Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 25m e período 5 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, isto é inexistente na análise estática. A tensão máxima portanto é de 214922,6 KPa e a deformação máxima é de 0.104%. É importante observar que ocorre um aumento de 33.34% em relação a tensão máxima estática.

8.4.2 Profundidade de 35m e período 5s

Para a profundidade de 35m o raio de curvatura que obteve as menores tensões foi o de 220m. O período de onda para essa análise foi de 5 segundos. Neste modelo foi feito a análise dinâmica aplicando as condições ambientais ditas anteriormente. Vale lembrar que o critério de lançamento simplificado é aqui utilizado, onde os níveis de tensão não deveriam ultrapassar $0.87 f_y$ (360.18Mpa) e os níveis de deformação não deveriam ultrapassar 0.29% na análise dinâmica para o aço X60. Os resultados se encontram logo abaixo:

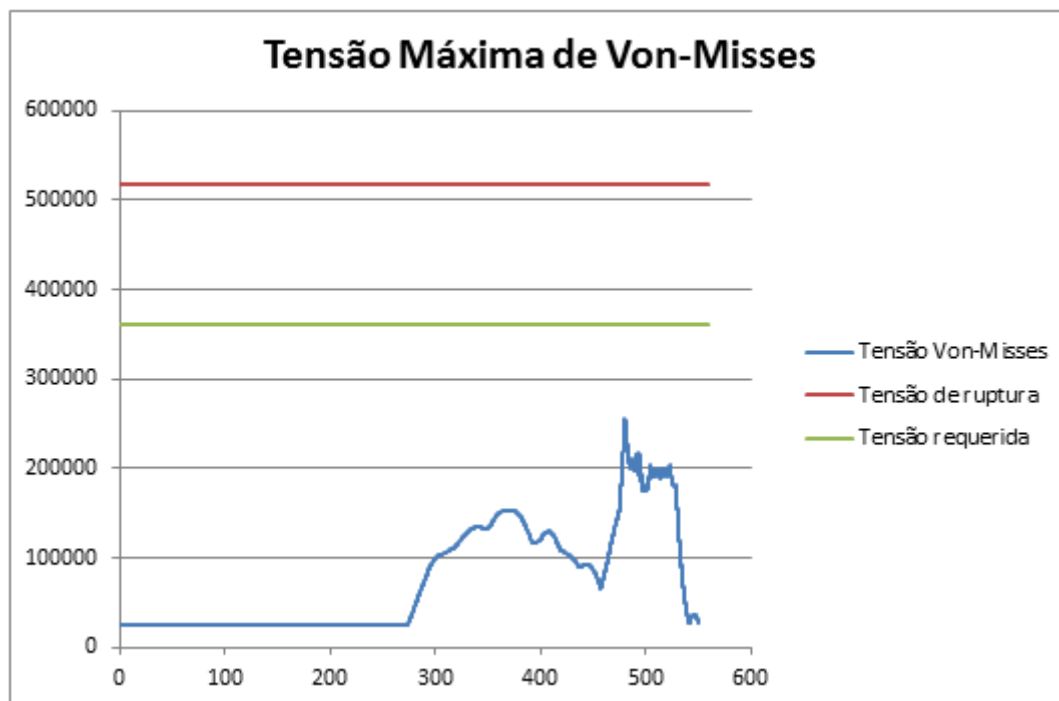


Gráfico 54 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 35m e período 5 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, porém os pontos próximos a ele no stinger não apresentam valores muito elevados, este tipo de comportamento é inexistente na análise estática sendo um fenômeno dinâmico. A tensão máxima é de 254750,3KPa e a deformação máxima é de 0.123%. É importante observar que ocorre um aumento de 36.86 % em relação a tensão máxima estática.

8.4.3 Profundidade de 45m e período 5s

Para a profundidade de 45m o raio de curvatura que obteve as menores tensões foi o de 190m. O período de onda para essa análise foi de 5 segundos. Neste modelo foi feito a análise dinâmica aplicando as condições ambientais ditas anteriormente. Vale lembrar que o critério de lançamento simplificado é aqui utilizado, onde os níveis de tensão não deveriam ultrapassar $0.87 f_y$ (360.18Mpa) e os níveis de deformação não deveriam ultrapassar 0.29% na análise dinâmica para o aço X60.. Os resultados se encontram logo abaixo:

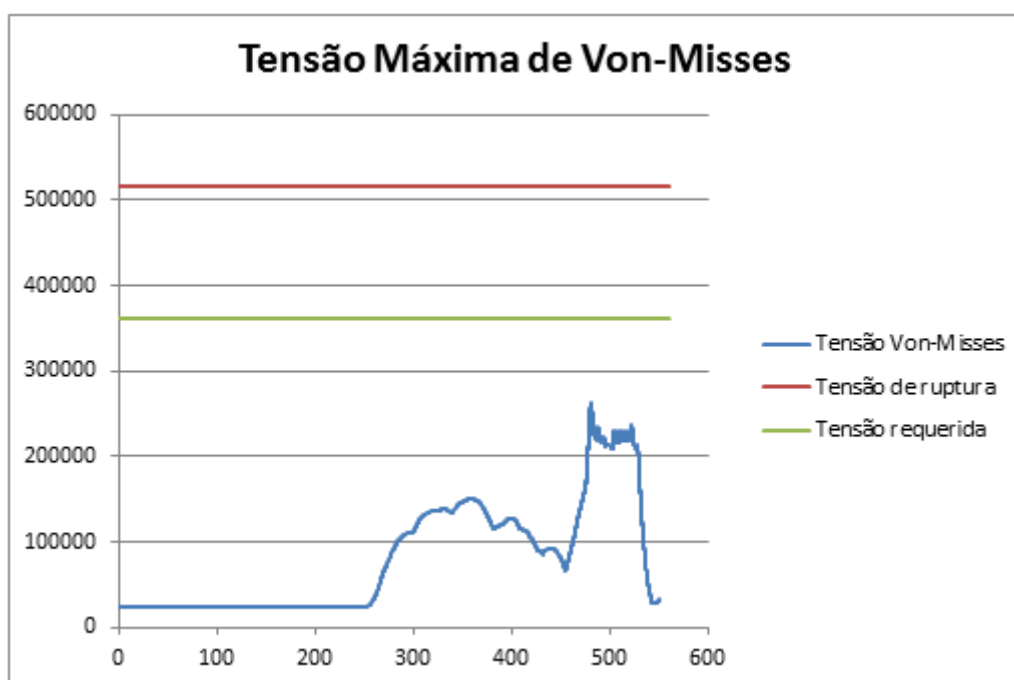


Gráfico 55 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 45m e período 5 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que levemente ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, porém os pontos próximos a ele no stinger não apresentam valores muito elevados. A tensão máxima é de 262819.31Kpa e a deformação máxima é de 0.127%. É importante observar que ocorre um aumento de 23.9 % em relação a tensão máxima estática.

8.4.4 Profundidade de 25m e período 6.5s

Agora variando o período da onda para 6.5 segundos e usando o modelo de profundidade 25m que possui raio de rampa e stinger de 260m foi obtido o seguinte gráfico de tensões:

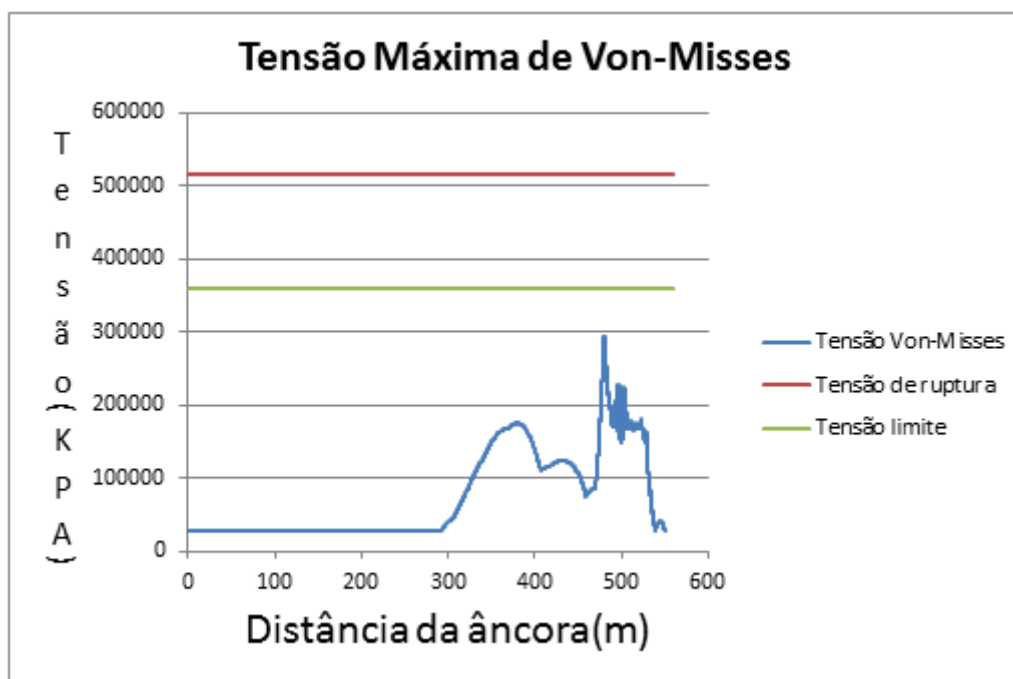


Gráfico 56 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 25m e período 6.5 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, os pontos próximos a ele no stinger apresentam valores também elevados de tensão. A tensão máxima é de 267857Kpa e a deformação máxima é de 0.129%. É importante observar que ocorre um aumento de 66.18% em relação a tensão máxima estática.

8.4.5 Profundidade de 35m e período 6.5s

Agora continuando usando o período da onda de 6.5 segundos e usando o modelo de profundidade 35m que possui raio de rampa e stinger de 220m foi obtido o seguinte gráfico de tensões:

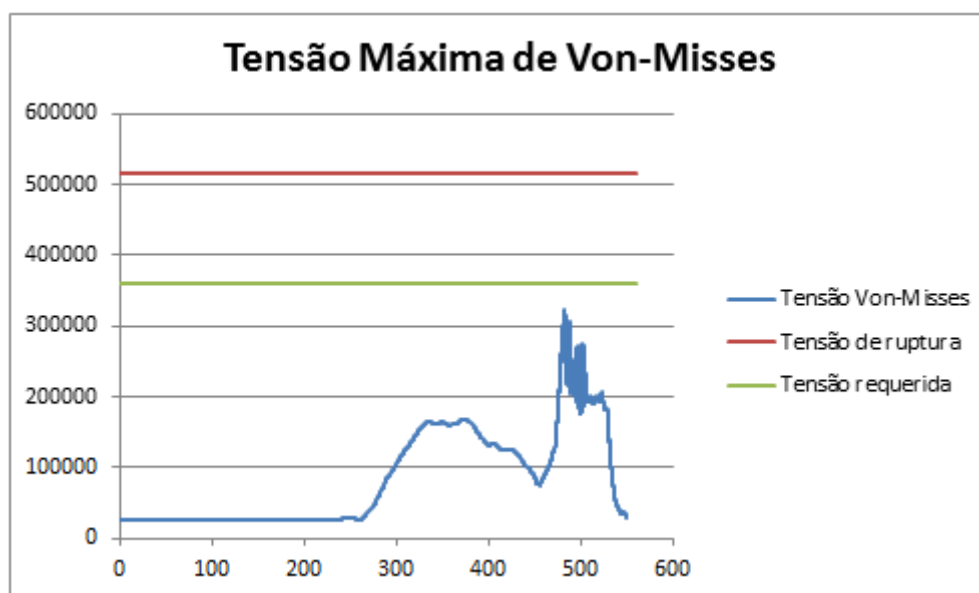


Gráfico 57 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 35m e período 6.5 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, os pontos próximos a ele no stinger apresentam valores também elevados de tensão. A tensão máxima é de 323680.3Kpa e a deformação máxima é de 0,156%. É importante observar que ocorre um aumento de 73,88% em relação a tensão máxima estática.

8.4.6 Profundidade de 45m e período 6.5s

Agora continuando usando o período da onda de 6.5 segundos e usando o modelo de profundidade 45m que possui raio de rampa e stinger de 190m foi obtido o seguinte gráfico de tensões:

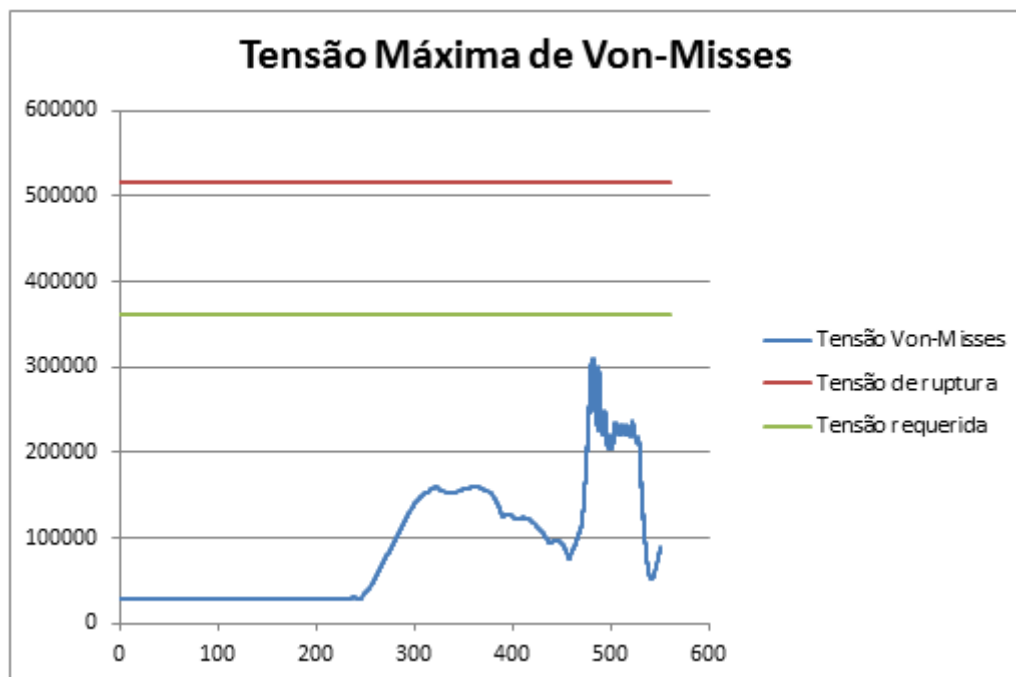


Gráfico 58 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 45m e período 6.5 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre levemente uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger. A tensão máxima é de 308977,52KPa e a deformação máxima é de 0,149%. É importante observar que ocorre um aumento de 45.66% em relação a tensão máxima estática.

8.4.7 Profundidade de 25m e período 8s

Agora variando o período da onda para 8 segundos e usando o modelo de profundidade 25m que possui raio de rampa e stinger de 260m foi obtido o seguinte gráfico de tensões:

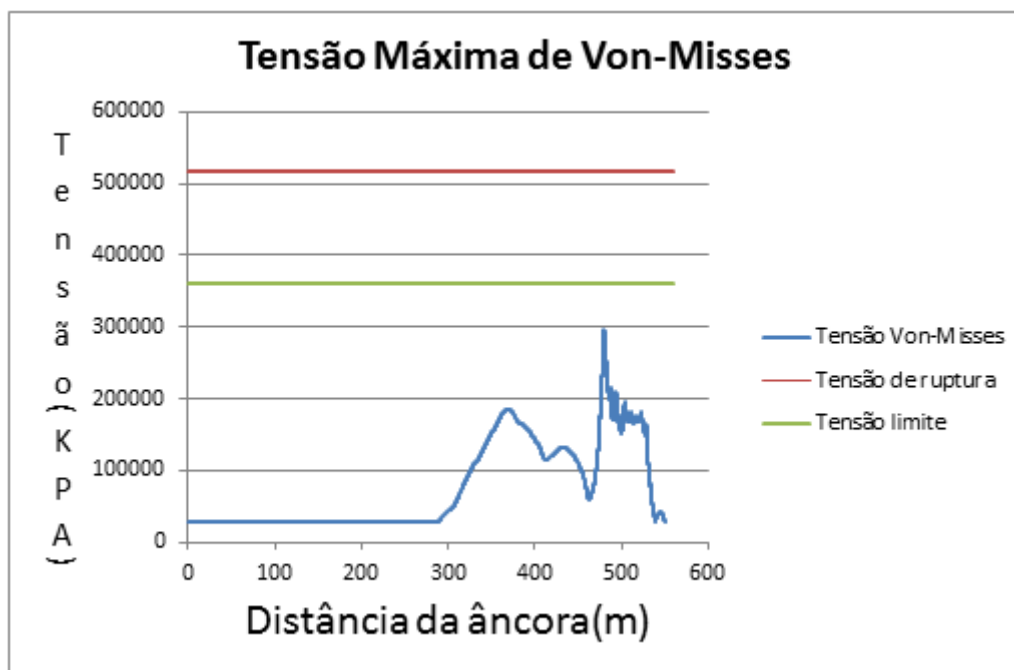


Gráfico 59 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 25m e período 8 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, os pontos próximos a ele no stinger apresentam valores também elevados de tensão. A tensão máxima é de 269000Kpa e a deformação máxima é de 0.130%. É importante observar que ocorre um aumento de 66.89% em relação a tensão máxima estática.

8.4.8 Profundidade de 35m e período 8s

Agora continuando usando o período da onda de 8 segundos e usando o modelo de profundidade 35m que possui raio de rampa e stinger de 220m foi obtido o seguinte gráfico de tensões:

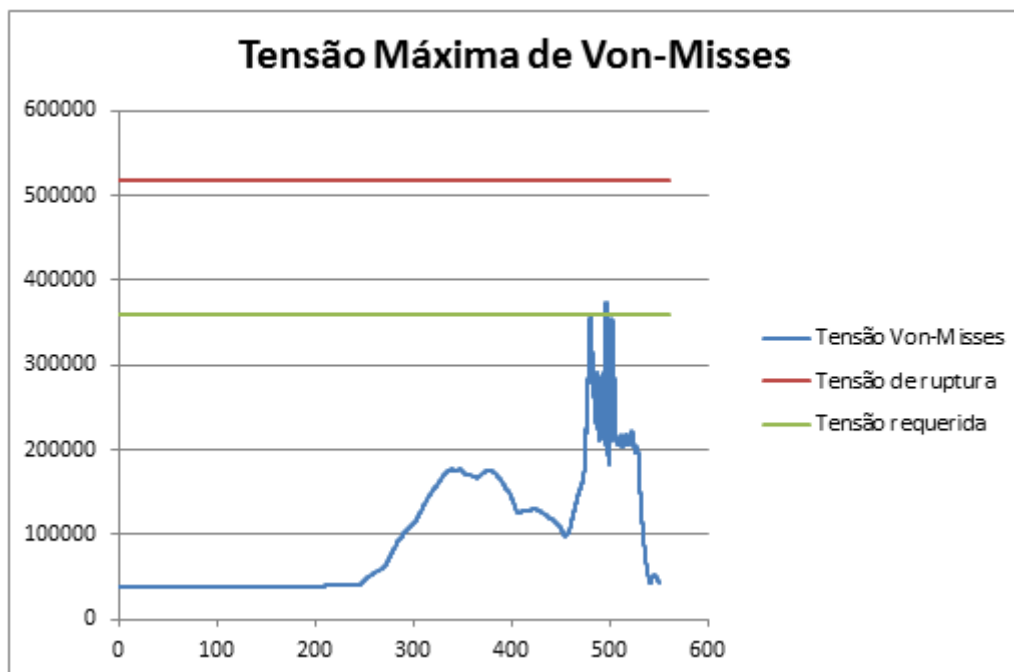


Gráfico 60 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 35m e período 8 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto no stinger, os pontos próximos a ele no stinger apresentam valores também elevados de tensão. A tensão máxima é de 372798Kpa e a deformação máxima é de 0.180%, este valor de tensão excede o limite estabelecido pela regra que é 360180Kpa, por este motivo foi realizado outra análise dinâmica com uma altura significativa de onde de 2m vista logo depois. É importante observar que ocorre um aumento de 100.3% em relação a tensão máxima estática.

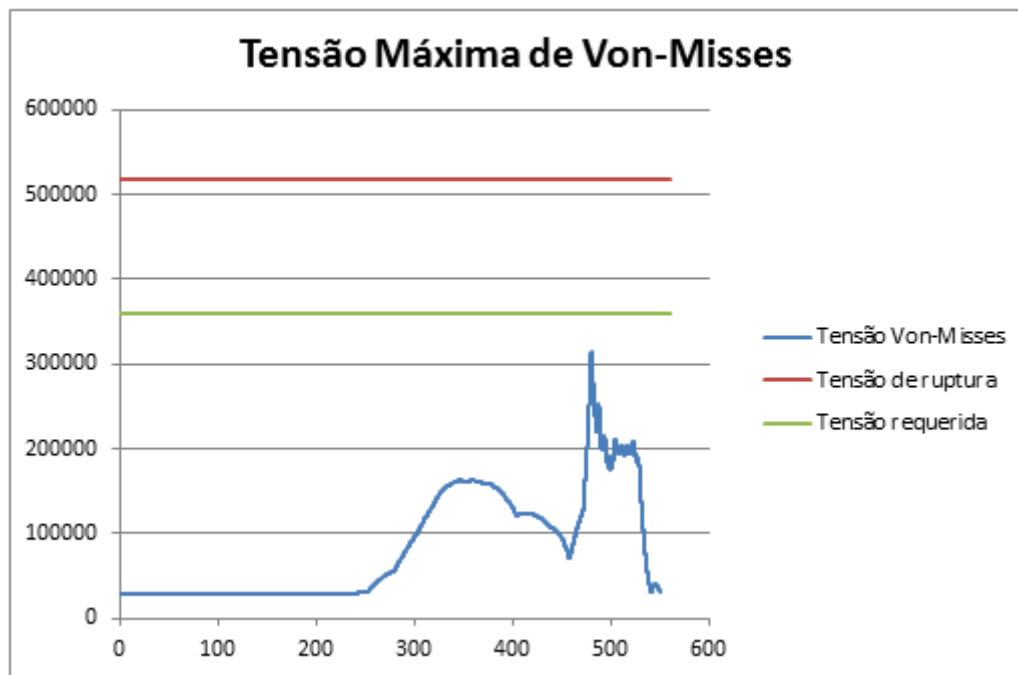


Gráfico 61- Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 35m e período 8 segundos e altura de onda 2m

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, os pontos próximos a ele no stinger apresentam valores que não são tão elevados. A tensão máxima é de 315187.9Kpa e a deformação máxima é de 0.152%, esse valor não excede o limite de regra. É importante observar que ocorre um aumento de 69.32% em relação a tensão máxima estática.

8.4.9 Profundidade de 45m e período 8s

Agora continuando usando o período da onda de 8 segundos e usando o modelo de profundidade 45m que possui raio de rampa e stinger de 190m foi obtido o seguinte gráfico de tensões:

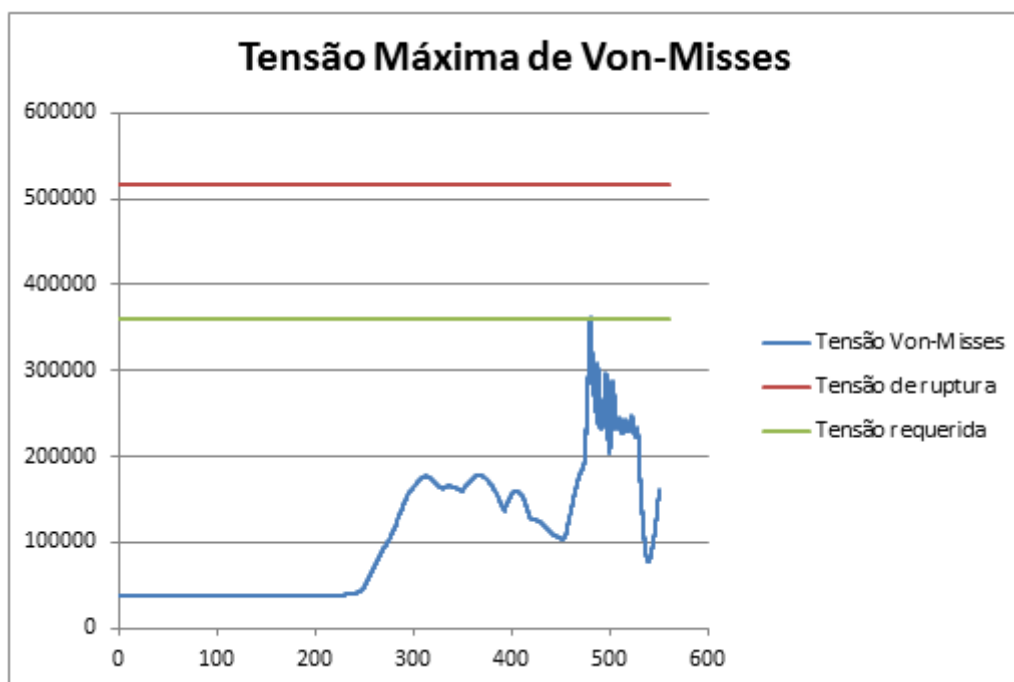


Figura 62 - Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 45m e período 8 segundos

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre levemente uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger. A tensão máxima é de 362604,5Kpa e a deformação máxima é de 0,175%, este valor de tensão excede o limite estabelecido pela regra que é 360180Kpa, por este motivo foi realizado outra análise dinâmica com uma altura significativa de onde de 2m vista logo depois. É importante observar que ocorre um aumento de 70.95% em relação a tensão máxima estática.

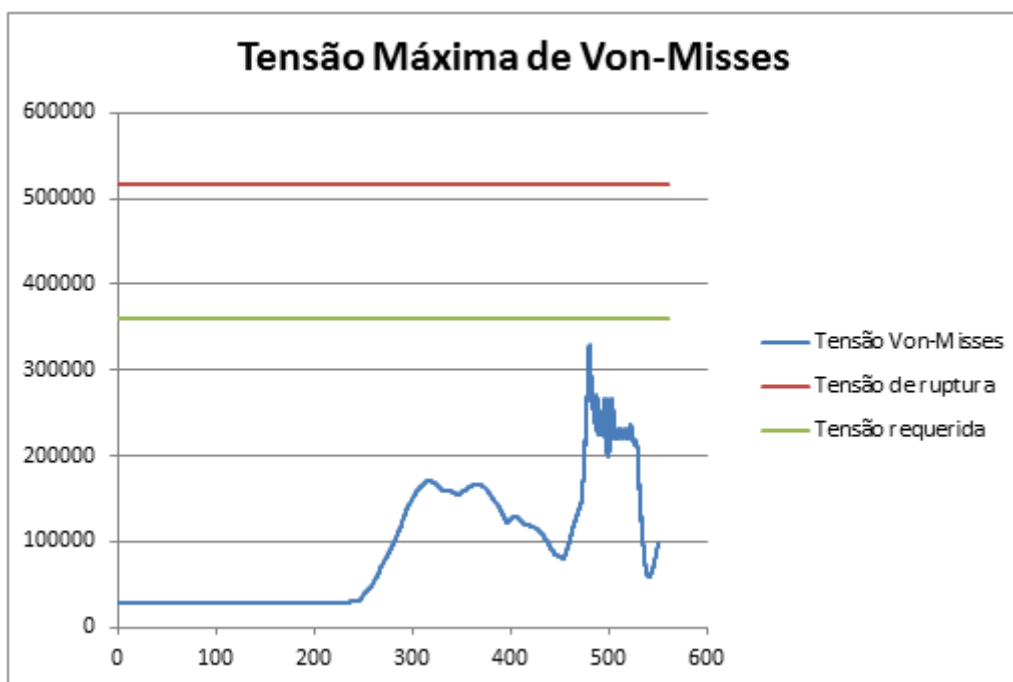


Gráfico 63- Gráfico para tensão de Von-Misses para análise dinâmica na profundidade de 45m e período 8 segundos e altura de onda 2m

Pelo gráfico acima se conclui que ocorre uma concentração de tensões num ponto do duto um pouco depois do stinger, os pontos próximos a ele no stinger apresentam valores que não são tão elevados. A tensão máxima é de 328888,7Kpa e a deformação máxima é de 0,159%%, esse valor não excede o limite de regra. É importante observar que ocorre um aumento de 55.05% em relação a tensão máxima estática.

8.5 Conclusão para análises Dinâmicas

Através dos gráficos anteriores se pode observar a importância das análises dinâmicas em relação ao comportamento das tensões em dutos que estão sendo lançados. Para o duto na profundidade 25m e raio de curvatura 260m a alteração máxima da tensão da análise estática em relação a dinâmica foi de 66.89%, aumento que é considerável, para o duto na profundidade 35m e raio de curvatura 220m a alteração máxima da tensão da análise estática em relação a dinâmica foi de 100.3%, chegando a transgredir a regra e por isso outra análise foi necessária para que não fosse excedido o valor de tensão da regra, para o duto na profundidade 45m e raio de curvatura 190m a alteração máxima da tensão da análise estática em relação a dinâmica foi de 70.95 % , aumento que também é bem significativo e que transgrediu a regra e por isso outra análise foi necessária para que não fosse excedido o valor de tensão da regra. Percebemos pelas análises anteriores que o período de onda tem influência considerável na variação de tensão no duto. Embora o enfoque principal do trabalho não seja as análises dinâmicas é de suma importância esse tipo de análise para o lançamento de dutos.

A seguir foi feito um gráfico mostrando a variação da tensão máxima para diferentes períodos de onda para os 3 modelos: 25m(260m), 35m(220m) e 45m(190m).

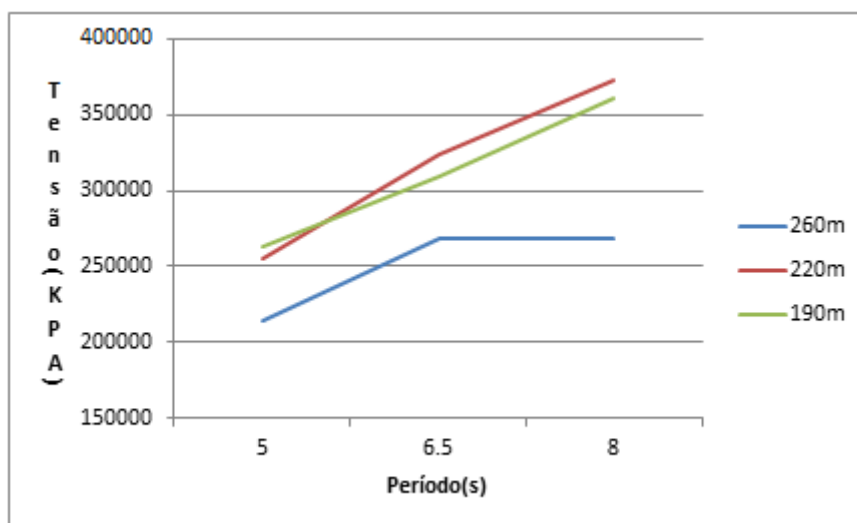


Gráfico 64 – Gráfico Tensão X período de onda para análises dinâmicas

9 Conclusões e Recomendações finais

9.1 Considerações Gerais

A partir dos estudos realizados no decorrer desse trabalho foram obtidas as seguintes conclusões:

- A maior parte das tensões nos dutos em lançamento está relacionada com o raio de curvatura e não com a tração de lançamento.
- A variação do ângulo da rampa-stinger reflete numa enorme variação de tensão. Existe um ponto onde a tensão atinge um valor mínimo (raio de curvatura ideal). Isso pode ser compreendido com as seguintes ilustrações:

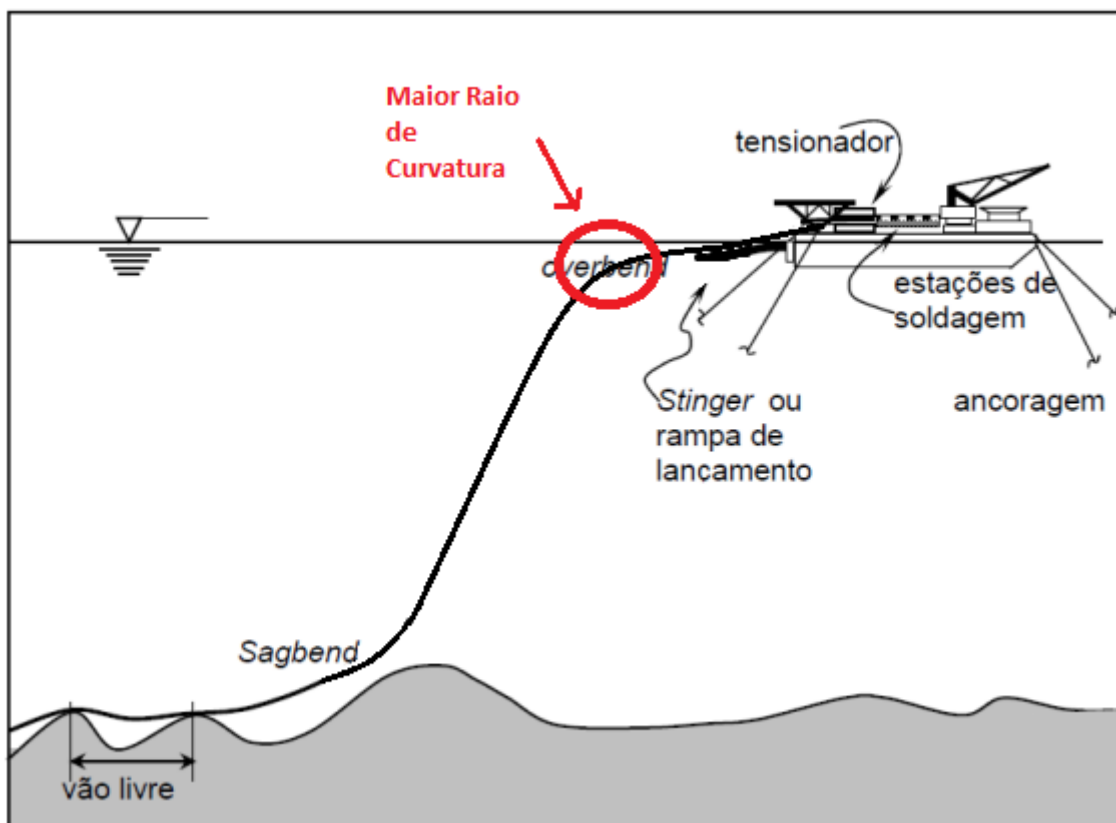


Figura 14 – Stinger com raio de curvatura alto

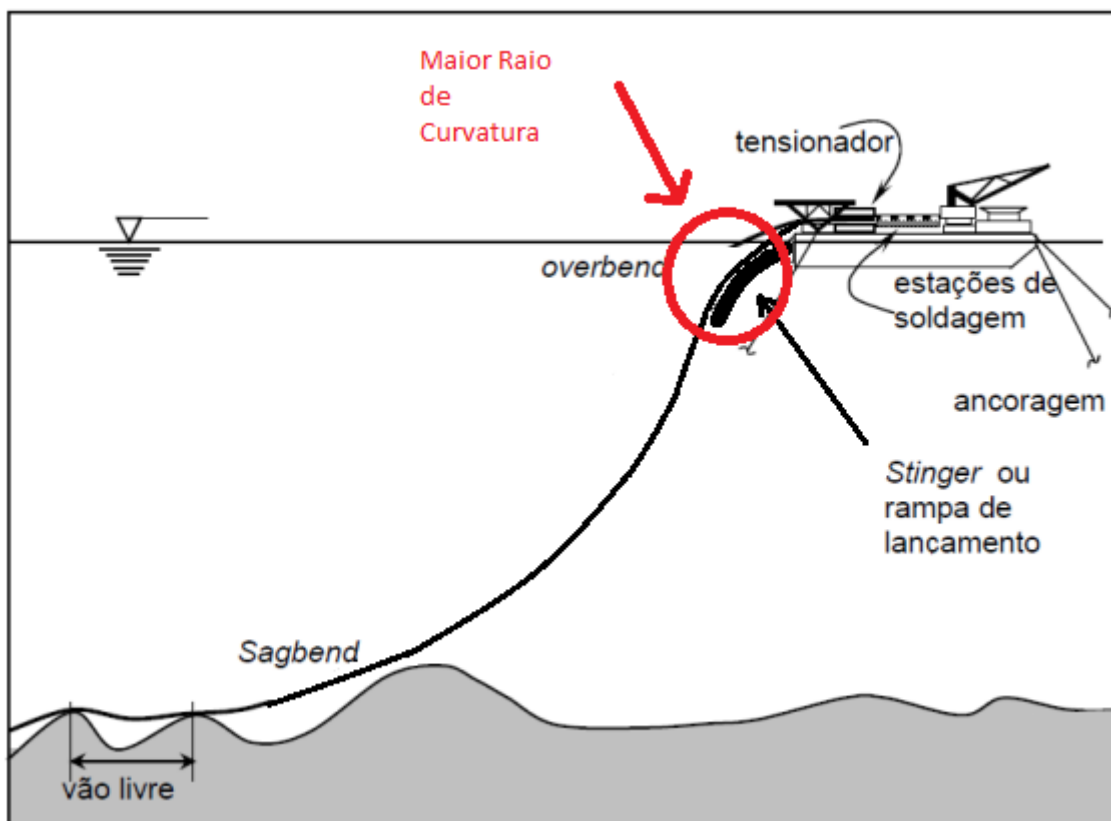


Figura 15 – Stinger com raio de curvatura baixo

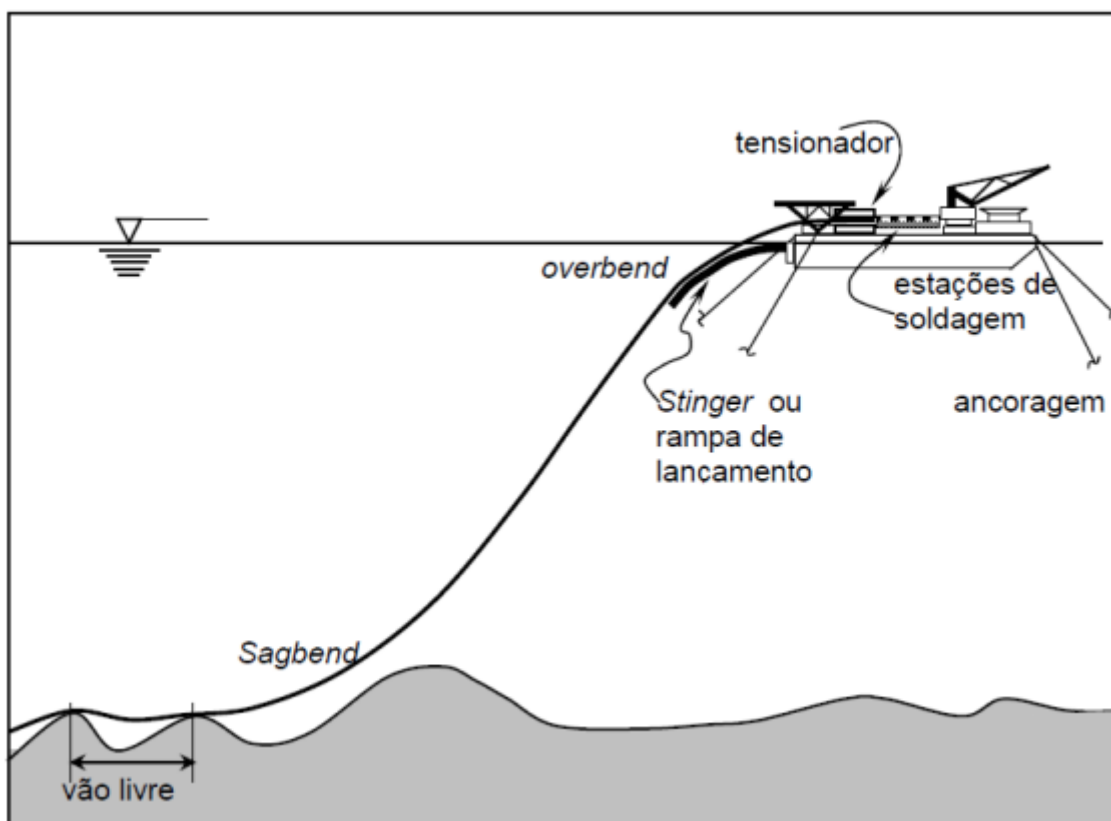


Figura 16 - Stinger com raio de curvatura ideal

- As regiões onde as solicitações de esforços são maiores é no stinger e próximo a ele na sua saída.
- O aumento de profundidade gera a necessidade de ângulos de lançamento cada vez menores.
- Na análise dinâmica se observa aumentos consideráveis nas tensões, sendo assim esta não pode ser dispensada, cuidado redobrado deve ser tomado em pontos concentradores de tensão.
- O período de onda crítico para esse tipo de plataforma é o de 8 segundos pois este gera movimentos maiores e portanto com maiores tensões.
- Intervalos de integração no tempo curtos juntamente com malhas refinadas são necessários nesse tipo de análise.

9.2 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo a linha de pesquisa deste trabalho, algumas sugestões para futuros trabalhos são a seguir apontadas:

- Outras espessuras de dutos poderiam também ser avaliados, sendo feito o mesmo estudo.
- Análises dinâmicas acopladas poderiam ser feitas e comparadas com análises dinâmicas desacopladas para se ter noção na diferença de tensões.
- Análises de tensões em offset de plataforma em todas as direções para obtenção de uma zona segura de operação para esse tipo de lançamento.
- Diferentes direções de carregamento também podem ser testadas.

10 Referências

- [1] DNV OS-F101, Submarine Pipeline Systems. Høvik, Det Norske Veritas, 2010.
- [2] API 5L, Specification for Line pipe, 42 ed., Washington, American Petroleum Institute, July 2000
- [3] GIRON, A.C., Aplicação de Metodologias de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risersna Exploração de Petróleo Offshore, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Maio de 2009.
- [4] WHEELER, J.D., “Method for Calculating Forces Procedure by Irregular Waves”, OTC 1006 Offshore Technology Conference, Houston, 1969.
- [5] JACOB, B.P, “Programa PROSIM: Simulação Numérica do Comportamento de Sistemas para Exploração de Petróleo Offshore – Manual Teórico”, Versão 3.2, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, dezembro de 2006.
- [6] “aulas-hdII.pdf” da disciplina “Hidrodinâmica Básica II” período 2010/2 : professor Juan Wanderley
- [7] ChakrabartiSubrata - handbook of offshore engineering, vol1
- [8] CORRÊA, F.N., Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas Offshore, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, 2003.
- [9] Planilha “Memória de Cálculo.xmcd” de Mauro Henrique Alves de Lima Junior.
- [10] API RP 2A-WSD, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design. 21 ed., American Petroleum Institute, dezembro 2000.